



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITORIO (ILATIT)**

ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

**INDICADORES ESTRATÉGICOS COMO MODELO DE INSPECCIÓN Y
EVALUACIÓN DE PATOLOGIAS EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

CECILIA ARASY CANTERO NÚÑEZ

Foz do Iguaçu
Mayo 2023

**INDICADORES ESTRATÉGICOS COMO MODELO DE INSPECCIÓN Y EVALUACIÓN
DE PATOLOGIAS EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.**

CECILIA ARASY CANTERO NÚÑEZ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Noé Villegas Flores
Coorientador: Prof. Dr. Diego Moraes Flores

Foz do Iguaçu
2023

CECILIA ARASY CANTERO NÚÑEZ

**INDICADORES ESTRATÉGICOS COMO MODELO DE INSPECCIÓN Y EVALUACIÓN
DE PATOLOGIAS EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Eng. Noé Villegas Flores
UNILA

Coorientador: Prof. Dr. Diego Moraes Flores
UNILA

Prof. Msc. Eng. Julio César Bizarreta Ortega
UNILA

Prof. Dr. Eng. Jiam Pires Frigo
UNILA

Foz do Iguaçu, ____ de _____ de ____.

TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): _____

Curso: _____

Tipo de Documento	
(.....) graduação	(.....) artigo
(.....) especialização	(.....) trabalho de conclusão de curso
(.....) mestrado	(.....) monografia
(.....) doutorado	(.....) dissertação
	(.....) tese
	(.....) CD/DVD – obras audiovisuais
	(.....) _____

Título do trabalho acadêmico: _____

Nome do orientador(a): _____

Data da Defesa: ____/____/____

Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons Licença 3.0 Unported*.

Foz do Iguaçu, ____ de _____ de _____.

Assinatura do Responsável

Dedico este trabajo a mi hija Jasy Valentina.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Tupã Nandējara ha Tupãsyne la Virgen de Guadalupe por haberme guiado en esta etapa de mi vida.

A mi mamá Mirtha y mi abuela Valentina, ejemplo de mujeres trabajadoras, dignas de ser admiradas, que a pesar de la distancia y el dolor de separarnos estuvieron presentes en todo momento, confiaron en mí, por sus palabras de aliento y cariño, por enseñarme el valor de sus oraciones, por ser mi inspiración y fortaleza. La distancia no fue nada comparado con el amor de madre que tuvieron hacía mí, por no perder nunca la esperanza de que este momento algún día llegaría. ¡¡Mamá y abuela, lo logramos!!

A mi abuela Lucy y abuelo Carlos por las palabras de aliento y cariño, por tenernos presente en sus oraciones.

A mi papá, hermanos, padrinos y tías/os por estar pendientes y acompañarme en el proceso.

A Rodolfo por el amor, paciencia, cariño, impulso, apoyo y crecimiento juntos. Gracias mi amor por no haberme soltado de la mano en mis peores momentos y por festejar conmigo mis mayores logros, por ser un papá amoroso y atento con nuestra hija.

A mis compañeros de lucha: Gloria gracias por ser la hermana que la vida me dio, por la paciencia, por tu apoyo incondicional, por hacer más llevadera la vida lejos de casa, por esas risas y lágrimas que solo nosotras sabemos y que pudimos salir adelante, ¡viste que si pudimos! A Paúl, gracias por escucharme y por tus palabras de apoyo. Ronald che kp y a Nathi gracias por el cariño y por estar presentes en todo momento, les debo muchísimo.

A Ruth, Gabes, Ricardo, Camila, Romi, Teo y Nataly por su amistad y por compartir conmigo estos años, por brindarme su apoyo y hacer más llevadera la vida académica.

A las familias: Martinez Iglesia, Santacruz Torres y López Caceres porque en algún momento me abrieron las puertas de su hogar y me ofrecieron un lugar en su mesa.

A mis amigas Lore y Guada M. que desde la distancia me tenían en sus oraciones, por sus palabras de ánimo y paciencia para escucharme.

A la Universidad Federal de la Integración Latino-Americana por haberme abierto las puertas para lograr concluir mi educación superior, a mi orientador el Prof. Noé por todos estos años de confianza puestos en mí, en mi investigación, en mi trabajo. Al cuerpo docente del curso de Ingeniería Civil de Infraestructura, en especial a los profesores: Julio,

Cesar, Jiam y Ulises.

Esto va dedicado también a los Inges: Valentina, Mateo, Emilyanna y Santiago, sus mamis son mujeres fuertes, valientes y capaces. ¡Están logrando esto y van por más!

*Umi mba'eita jaikuaáva ha ñane arandupy ñanemoirũ
mamo jahahápe, akói jaraha ñandepype ha ohechauka
mávapa ñande ha umi jahupytýva.*
Mirtha Núñez.

RESUMO

A construção de um pavimento asfáltico é planejada para garantir segurança, conforto e suavidade no trânsito aos usuários, oferecendo uma superfície adequada ao trânsito, resistindo às intempéries e às cargas do tráfego. Uma estrada em ótimas condições proporciona crescimento econômico e social às regiões próximas, permitindo uma melhor comunicação e mobilidade de pessoas e bens, o que, por sua vez, aumenta as oportunidades de emprego, comércio e turismo. O desenvolvimento de modelos multicritérios na fiscalização e a implantação de tecnologia na coleta de dados na avaliação de rodovias é inovador. Embora existam modelos de inspeção de pavimentos, eles não consideram a avaliação de múltiplos critérios e patologias, o que limita uma avaliação completa do pavimento, além disso, os métodos tradicionais de inspeção podem ser caros e demorados. O novo modelo de inspeção multicritério para pavimentos flexíveis desenvolvido neste estudo considera múltiplos critérios e patologias, além do uso de dispositivos eletrônicos não tripulados e registro fotográfico aéreo que permite uma avaliação mais rápida e precisa do pavimento de forma a contribuir para a tomada de decisão da administração pública. O modelo desenvolvido utiliza a teoria de decisão multicritério, especificamente o processo hierárquico analítico (AHP). O modelo considera três requisitos principais de avaliação: conforto, funcional e estrutural, e diagnostica 15 (quinze) patologias. Com base no modelo desenvolvido, foram avaliadas 10 (dez) rodovias em Foz de Iguaçu (Brasil) com alto fluxo de veículos e facilidade de identificação das patologias correspondentes, posteriormente é obtido o IDP (Índice de Deterioração Patológica), além disso, o processamento é realizado o registro fotográfico de 4 (quatro) vias urbanas que permite obter como representação em mapas de calor através de sistemas de informações geográficas (GIS). Estes mapas permitem uma visualização mais clara e objetiva dos pontos críticos na manutenção do pavimento, identificando as áreas com maior necessidade de intervenção. A aplicação do modelo multicritério desenvolvido pode ser útil para a gestão e planejamento de projetos de manutenção e reabilitação rodoviária. Este modelo representa uma alternativa eficaz para avaliar e diagnosticar pavimentos flexíveis em diferentes cenários, contribuindo para uma tomada de decisão eficaz e assertiva.

Palavras-chave: Pavimentação, multicritério, processo de hierarquia analítica (AHP), dispositivos eletrônicos não tripulados (drones), sistemas de informação geográfica (GIS).

RESUMEN

La construcción de un pavimento asfáltico se planifica para garantizar seguridad, confort y suavidad en el tránsito para los usuarios, ofreciendo una superficie adecuada para el tránsito, resistiendo intemperies y cargas del tráfico. Una vía en óptimas condiciones proporciona un crecimiento económico y social a regiones cercanas, permitiendo una mejor comunicación y movilidad de personas y bienes, lo que, a su vez, incrementa oportunidades de empleo, comercio y turismo. El desarrollo de modelos multicriterio en la inspección y la implementación de tecnología en el levantamiento de datos en la evaluación de las vías es innovador. Si bien existen modelos de inspección de pavimentos, estos no consideran la evaluación de múltiples criterios y patologías, lo que limita brindar una evaluación completa del pavimento, además, los métodos tradicionales de inspección pueden ser costosos y demorados. La propuesta de modelo multicriterio de inspección de pavimentos flexibles desarrollado en este estudio considera múltiples criterios y patologías, además del uso de dispositivos electrónicos no tripulados y el registro fotográfico aéreo que permite una evaluación más rápida y exacta del pavimento con el fin de contribuir en la toma de decisión de la administración pública. El modelo desarrollado utiliza la teoría de decisión multicriterio, específicamente el análisis de valor jerárquico (AHP). El modelo considera tres requisitos principales de evaluación: confort, funcional y estructural, y diagnostica 15 (quince) patologías. A partir del modelo desarrollado se evaluaron 10 (diez) vías en Foz de Iguaçu (Brasil) con alta afluencia de vehículos y facilidad para identificar las patologías correspondientes, posteriormente se obtiene el IDP (Índice de Deterioro Patológico), además, se realiza el procesamiento de los registros fotográficos de 4 (cuatro) vías urbanas que permite obtener como representación en mapas de calor mediante los sistemas de información geográfica (SIG). Estos mapas permiten una visualización más clara y objetiva de los puntos críticos en el mantenimiento del pavimento, identificando las áreas más necesitadas de una intervención. La aplicación del modelo multicriterio desarrollado puede ser útil para la gestión y el planeamiento de proyectos de mantenimiento y rehabilitación de vías. Este modelo representa una alternativa eficaz para evaluar y diagnosticar pavimentos flexibles en distintos escenarios, contribuyendo a la toma de decisiones efectiva y asertiva.

Palabras clave: Pavimento, multicriterio, analytic hierarchy process (AHP), dispositivos electrónicos no tripulados (drones), sistemas de información geográfica (SIG).

ABSTRACT

The construction of an asphalt pavement is planned to ensure safety, comfort and smoothness in traffic for users, offering a suitable surface for traffic, resisting the weather and traffic loads. A road in excellent conditions provides economic and social growth to nearby regions, allowing better communication and mobility of people and goods, which, in turn, increases opportunities for employment, commerce and tourism. The development of multicriteria models in inspection and the implementation of technology in data collection in the assessment of highways is innovative. Although there are pavement inspection models, they do not consider the evaluation of multiple criteria and pathologies, which limits a complete pavement evaluation, in addition, traditional inspection methods can be expensive and time-consuming. The new multicriteria inspection model for flexible pavements developed in this study considers multiple criteria and pathologies, in addition to the use of unmanned electronic devices and aerial photographic recording that allows a faster and more accurate evaluation of the pavement in order to contribute to the decision making of the public administration. The model developed uses multicriteria decision theory, specifically the hierarchical analytical process (AHP). The model considers three main evaluation requirements: comfort, functional and structural, and diagnoses 15 (fifteen) pathologies. Based on the developed model, 10 (ten) highways in Foz de Iguaçu (Brazil) with a high flow of vehicles and ease of identification of the corresponding pathologies were evaluated, later the IDP (Pathological Deterioration Index) is obtained, in addition, the processing a photographic record of 4 (four) urban roads is carried out, which allows obtaining representation in heat maps through geographic information systems (GIS). These maps allow for a clearer and more objective view of the critical points in pavement maintenance, identifying the areas most in need of intervention. The application of the developed multicriteria model can be useful for the management and planning of road maintenance and rehabilitation projects. This model represents an effective alternative for evaluating and diagnosing flexible pavements in different scenarios, contributing to effective and assertive decision-making.

Key words: Pavement, multicriteria, analytical hierarchy process (AHP), unmanned electronic devices (drones), geographic information systems (GIS).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la sección transversal del pavimento.....	27
Figura 2. Condición típica del pavimento durante su ciclo de vida.	28
Figura 3. Sección transversal típica de pavimento flexible.	29
Figura 4. Deformación elástica por la carga en el Pavimento flexible.	29
Figura 5. Extensión de la red vial brasileira.....	30
Figura 6. Vía urbana con signos de deterioro por manifestaciones patológicas.....	33
Figura 7. Esquema de la estructura jerárquica del problema	37
Figura 8. Modelo de gestión de patologías en pavimentos	44
Figura 9. Manifestación patológica “Bache”.....	46
Figura 10. Manifestación patológica “Parche”.	47
Figura 11. Manifestación patológica “Ahuellamiento”	48
Figura 12. Manifestación patológica “Ondulación”.....	49
Figura 13. Manifestación Patológica "Exudación"	50
Figura 14. Manifestación Patológica "Pulimento del Agregado"	51
Figura 15. Manifestación Patológica "Pérdida del agregado"	52
Figura 16. Manifestación Patológica “Piel de cocodrilo”	53
Figura 17. Manifestación Patológica "Fisuras en bloque".....	54
Figura 18. Manifestación Patológica "Fisura de borde"	55
Figura 19. Manifestación Patológica " Fisura longitudinal"	56
Figura 20. Manifestación Patológica "Fisuración por reflexión de juntas".....	57
Figura 21. Manifestación Patológica " Fisura transversal".....	58
Figura 22. Manifestación Patológica "Afloramiento de finos".....	59
Figura 23. Manifestación Patológica "Separación de la berma"	60
Figura 24. Presentación del despliegue de requerimientos en criterios e indicadores	61
Figura 25. Manifestaciones patológicas en la Avenida Gramado	81
Figura 26. Manifestaciones patológicas en la Avenida Gramado	81
Figura 27. Manifestaciones patológicas en la Avenida Araucária	83
Figura 28. Manifestaciones patológicas en la Avenida Araucária	83
Figura 29. Manifestaciones patológicas en la Rua Guarujá	85
Figura 30. Manifestaciones patológicas en la Rua Guarujá	86

Figura 31. Manifestaciones patológicas en la Rua Nilópolis.....	89
Figura 32. Manifestaciones patológicas en la Rua D.....	91
Figura 33. Dispositivo electrónico no tripulado Mavic Pro DJI.	93
Figura 34. Índice de deterioro patológico para el requerimiento “confort” por vía urbana.	108
Figura 35. Índice de deterioro patológico para el requerimiento “funcional” por vía urbana.	109
Figura 36. Índice de deterioro patológico para el requerimiento “estructural” por vía urbana.	109
Figura 37. Índice de deterioro patológico para el estudio de caso en la ciudad de Foz do Iguaçu.....	111

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografía 1. Levantamiento piloto Avenida Gramado a 20 metros de altura.	94
Fotografía 2. Levantamiento aéreo de la Avenida Gramado	95
Fotografía 3. Levantamiento aéreo de la Avenida Gramado	95
Fotografía 4. Levantamiento aéreo de la Avenida Araucária	96
Fotografía 5. Levantamiento aéreo de la Avenida Araucária	97
Fotografía 6. Levantamiento aéreo de la Avenida Florianópolis	98
Fotografía 7. Levantamiento aéreo de la Avenida Florianópolis	98
Fotografía 8. Levantamiento aéreo de la Avenida Olímpico Rafagnin	99
Fotografía 9. Levantamiento aéreo de la Avenida Olímpico Rafagnin	100
Fotografía 10. Mapa georreferenciado de la Avenida Gramado.	113
Fotografía 11. Mapa georreferenciado de la Avenida Gramado.	114
Fotografía 12. Mapa georreferenciado de la Avenida Araucária.	115
Fotografía 13. Mapa georreferenciado de la Avenida Araucária.	115
Fotografía 14. Mapa georreferenciado de la Avenida Florianópolis.	116
Fotografía 15. Mapa georreferenciado de la Avenida Florianópolis.	116
Fotografía 16. Mapa georreferenciado de la Avenida Olímpico Rafagnin.	117
Fotografía 17. Mapa georreferenciado de la Avenida Olímpico Rafagnin.	118

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Aplicación del Método Multicriterio.....	35
Tabla 2. Escala fundamental de números absolutos.	38
Tabla 3. Estructura recíproca de la matriz de comparación por pares para indicadores. ..	39
Tabla 4. Árbol de Requerimientos	61
Tabla 5. Indicadores considerados en el estudio.....	63
Tabla 6. Pesos de cada atributo evaluado para el estudio.	65
Tabla 7. Parámetros del indicador "Piel de Cocodrilo"	66
Tabla 8. Parámetros del indicador "Fisura de Bloque"	67
Tabla 9. Parámetros del indicador "Pulimento del agregado"	67
Tabla 10. Parámetros del indicador "Fisura de borde"	68

Tabla 11. Parámetros del indicador "Fisura longitudinal"	68
Tabla 12. Parámetros del indicador "Fisura por reflexión de juntas"	69
Tabla 13. Parámetros del indicador "Fisura transversal"	70
Tabla 14. Parámetros del indicador "Parches"	70
Tabla 15. Parámetros del indicador "Ahuellamiento"	71
Tabla 16. Parámetros del indicador "Ondulación"	72
Tabla 17. Parámetros del indicador "Exudación"	73
Tabla 18. Parámetros del indicador "Afloramiento de finos"	73
Tabla 19. Parámetros del indicador "Baches"	74
Tabla 20. Parámetros del indicador "Pérdida del agregado"	75
Tabla 21. Parámetros del indicador "Separación de la berma"	75
Tabla 22. Vías urbanas seleccionadas para el caso de estudio.	78
Tabla 23. Intervalos de puntuación de los indicadores del estudio.	79
Tabla 24. Ficha de levantamiento de la Avenida Gramado	80
Tabla 25. Ficha de levantamiento de la Avenida Andradina	82
Tabla 26. Ficha de levantamiento de la Avenida Araucária	82
Tabla 27. Ficha de levantamiento de la Avenida Nacional	84
Tabla 28. Ficha de levantamiento de la Rua Guarujá	85
Tabla 29. Ficha de levantamiento de la Avenida Florianópolis	86
Tabla 30. Ficha de levantamiento de la Avenida Olímpico Rafagnin	87
Tabla 31. Ficha de levantamiento de la Rua Nilópolis	88
Tabla 32. Ficha de levantamiento de la Rua Manaus	89
Tabla 33. Ficha de levantamiento de la Rua D	90
Tabla 34. Resumen de los niveles de severidad encontrados por indicador en las vías analizadas	91
Tabla 35. Vías urbanas analizadas con el uso de dispositivos electrónicos no tripulados	92
Tabla 36. Leyenda adoptada para el procesamiento de imágenes.	101
Tabla 37. Pesos atribuidos al árbol de requerimientos.	104
Tabla 38. Peso total por Indicador	105
Tabla 39. Resultado del nivel de intensidad del daño por indicador en la inspección visual.	105
Tabla 40. Índice de deterioro patológico de cada INDICADOR por vía urbana.	106
Tabla 41. Índice de deterioro patológico de cada CRITERIO por vía urbana.	107
Tabla 42. Índice de deterioro patológico de cada REQUERIMIENTO por vía urbana.	108

Tabla 43. Índice de deterioro patológico final por vía urbana.	110
Tabla 44. Cuantificación de indicadores en las vías urbanas por medio del levantamiento aéreo.....	119
Tabla 45. Valoración y nivel de severidad del estudio de caso en la ciudad de Foz do Iguaçu.	141
Tabla 46. Frecuencia de las manifestaciones patológicas del estudio de caso en la ciudad de Foz do Iguaçu (unidades de medida en metros).....	142

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHP	Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process)
CTN	Confederação Nacional do Transporte
DNIT	Departamento Nacional de Infraestructura de Transportes
FHWA	Federal Highway
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSD	Ground Sample Distance
ILATIT	Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território
INVIAS	Instituto Nacional de Vías
KML	Keyhole Markup Language
MDE	Modelo Digital de Elevación
MDS	Modelo Digital de Superficie
RTK	Real Time Kinematic
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana

ÍNDICE

RESUMO	9
RESUMEN	10
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	12
LISTA DE FOTOGRAFIAS	12
LISTA DE TABLAS	12
LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS	15
1 CAPITULO: INTRODUCCIÓN	18
1.1. Objetivo General	23
1.2. Objetivos Especificos	23
1.3. Limitaciones de la investigación	24
1.4. Estructura del trabajo	25
2 CAPITULO: ESTADO DEL CONOCIMIENTO	26
2.1. Pavimentos	26
2.1.1 Pavimentos Flexibles	28
2.2. Movilidad Urbana	29
2.2.1. Sistema de Transporte	31
2.2.2. Desarrollo económico y social	31
2.3. Fallas Superficiales	32
2.4. Metodología Multicriterio	34
2.4.1. Analytic Hierarchy Process (AHP)	37
2.5. Dispositivos electronicos no tripulados	40
2.6. Sistemas de Información Geográfica	42
3 CAPITULO: METODOLOGÍA	43
3.1. Caracterización Metodológica	43
3.1.1. Estructura Principal del modelo de gestión	45
3.1.1.1. Baches y Parches	45
3.1.1.2. Deformaciones Superficiales	47
3.1.1.3. Daños Superficiales	50
3.1.1.4. Fisuras	52
3.1.1.5. Otros daños	59
3.2. Construcción del modelo multicriterio	60
3.2.1. Árbol de Requerimientos	60

3.2.2. Asignación de pesos por AHP	64
3.2.3. Análisis y definición del grado de deterioro	65
4 ESTUDIO DE CASO: FOZ DO IGUAÇU	77
4.1. Límites del estudio	77
4.2. Levantamiento de datos.....	78
4.2.1. Etapa de campo	78
4.2.2. Uso de dispositivos electrónicos no tripulados	92
4.2.3. Sistemas de Información Geográfica	100
5 ANALISIS DE RESULTADOS	103
5.1. Índice de deterioro patológico (IDP).....	103
5.1.1. Resultados obtenidos en campo con la inspección visual.....	104
5.2. Mapas de calor	111
5.2.1. Resultados obtenidos por levantamiento aéreo fotográfico.....	112
6 CONCLUSIONES	120
7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122
8 ANEXOS.....	133

1 CAPITULO: INTRODUCCIÓN

La construcción de un pavimento está planificada con la finalidad de garantizar seguridad, suavidad y comodidad de tránsito a los usuarios (DE FIGUEIREDO; RODRIGUES; RIBAS, 2022). La estructura del pavimento consiste de varias capas sucesivas que trabajan en conjunto (RIBEIRO; BEZERRA; NETO PINHEIRO, 2017) y que en la mayoría de los casos, están dispuestas por elementos como son: carpeta de rodamiento, base, sub base y subrasante (BENITEZ; INTRIAGO, 2020).

La función principal de la superficie asfáltica es proporcionar un plano de rodamiento adecuado brindando comodidad y seguridad a los usuarios, resistir esfuerzos verticales producidos por las acciones del tránsito distribuyendo las tensiones absorbidas a las camadas existentes (PINHEIRO; SILVA; SALOMÃO, 2021).

Por un lado, el pavimento debe soportar las intemperies, permitir movimientos suaves, no causar desgastes excesivos de las llantas ni altos niveles de ruidos y por otro, soportar el flujo de vehículos, permitir el drenaje eficiente y resistir al deslizamiento (CNT, 2022).

La evaluación del pavimento puede ser realizada desde el punto de vista estructural y funcional (GUILHERME et al., 2018). El seguimiento habitual del desempeño funcional y estructural de un pavimento es imprescindible dentro de un sistema de administración por la influencia directa en los costos de mantenimiento y conservación de la vía, costos operacionales, interrupciones de tráfico, accidentes, etc. (MACHADO; MARQUES; ROCHA, 2020).

La gestión de la infraestructura vial debe encontrarse en correctos escenarios para brindar crecimiento y desarrollo económico a una región. Esto se traduce en beneficios económicos, sociales, ambientales y un progreso significativo de los bienes patrimoniales (SILVA-BALAGUERA; LEGUIZAMÓN; VALIENTE, 2018; VALAREZO, 2018).

Los métodos complejos para obtener información sobre el desempeño y la condición funcional y estructural de los pavimentos requieren, en última instancia, tecnología y equipos especiales, así como habilidades técnicas, lo que aumenta los costos de análisis. En ausencia de información de fácil acceso y de bajo costo, a menudo los métodos utilizados para distribuir los recursos son la colaboración, el sesgo político o los incentivos contrarios a los valores de la gestión de pavimentos (DE AZEVEDO; RIBAS; DE OLIVEIRA, 2020).

Desde el punto de vista de los usuarios el criterio más importante es la funcionalidad

de la vía, ya que los defectos encontrados en la superficie de la capa asfáltica son los que están directamente relacionados a la comodidad y seguridad de la vía, afectando indirectamente a los costos operacionales de los vehículos (BRANCO; SEGANTINE, 2015; GUILHERME et al., 2018).

Bajo ese contexto, el objetivo de la inspección del deterioro de un pavimento busca identificar las anomalías, irregularidades y las posibles causas (hipótesis) del surgimiento de la “manifestación patológica”, con el objetivo de obtener un presupuesto suficiente para reparar y mantener la estructura, con el fin de no permitir la decadencia precoz de la vía urbana (TONDELO; BARTH, 2019).

La condición de la superficie del pavimento repercute directamente con los gastos de mantenimiento de los vehículos. Una vía que se encuentra en mejor calidad proporciona al usuario una reducción considerable en costos operacionales y a su vez permite un desplazamiento a mayor velocidad (RIBEIRO; BEZERRA; NETO PINHEIRO, 2017).

Interrumpir o reducir la frecuencia o intensidad de los servicios de mantenimiento de los pavimentos significa un aumento de los costos operacionales de los vehículos y el incremento de la necesidad de invertir más en recuperación de vías (PARENTE; FELIX; PICANÇO, 2017).

Un mantenimiento correctamente programado, formulado y aplicado puede brindar seguridad y comodidad necesarias para el uso de las carreteras, reduciendo costos y reparaciones requeridas, al mismo tiempo que mantiene las carreteras en buenas condiciones a largo plazo (SILVA-BALAGUERA; LEGUIZAMÓN; VALIENTE, 2018).

En Brasil, la mayor parte del transporte de personas y de cargas es realizado por el medio viario (PARENTE; FELIX; PICANÇO, 2017), siendo las vías urbanas el elemento importante para el desarrollo del país a nivel social, conforme al movimiento de personas, y al nivel financiero, durante el transporte de productos (ALVES; FERNANDES; BERTEQUINI, 2018). La deficiencia de estos elementos (sistemas viarios) podrían resultar en la pérdida de competitividad de los productos brasileños en el mercado internacional y elevar los costos para toda la sociedad (CNT, 2022).

En el contexto internacional, las inspecciones visuales se realizan a partir de manuales y orientaciones tales como son: “*The Distress Identification Manual*”, desarrollado para proporcionar una base uniforme y consistente para recopilar datos de fallas para el programa LTPP (*Long-Term Pavement Performance Program*), que permite que los estados y otros proporcionen datos precisos, consistentes y comparables sobre la condición de las secciones de prueba LTPP (NEGA et al., 2015).

El uso de modelos desarrollados con datos LTPP fuera de América del Norte, es posible debido a que el LTPP considera combinaciones amplias de características climáticas, de tráfico y de superficie de la carretera suficientes para establecer relaciones generales entre los diversos factores (HADDAD; CHEHAB; SAAD, 2021).

Las normas del Brasil están definidas por el *Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes* del año 2005, donde se establecen un conjunto de normativas para la evaluación y análisis de la condición de la superficie asfáltica.

DNIT 005/2003 - TER (*Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos-Terminologia*). DNIT 006/2003 - PRO (*Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Procedimiento*). DNIT 007/2003 - PRO (*Levantamento para avaliação da condição de superfície de subtrecho homogêneo de rodovias de pavimentos flexíveis e semi-rígidos para gerência de pavimentos e estudos e projetos - Procedimiento*). DNIT 008/2003 - PRO (*Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos procedimento*). DNIT 009/2003 - PRO (*Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Procedimiento*).

Todas estas normativas mencionadas forman parte del *Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos* que ofrecen herramientas (y modelos) que apoyan en la evaluación de las condiciones de las vías urbanas (e interurbanas) a partir de los modelos de inspección.

En el Brasil las vías asfálticas sufren de una infraestructura decadente, baja calidad y poca extensión, dificultando el desarrollo del sector rodoviario (GUILHERME et al., 2018). Gran parte de los procedimientos de control de calidad de pavimentos no presentan muchas alternativas que sean viables para una toma de decisión acerca de la corrección a ser empleada (FERRI et al., 2017).

En contexto Latinoamericanos, en países como Paraguay, las normas de evaluación de las condiciones del pavimento se encuentran en el Manual de Carreteras del Paraguay, fundamentadas en la AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) (MOPC, 2011).

En la actualidad, en América Latina las herramientas, modelos de inspección, revisión de deformaciones y grados de deterioro de vías urbanas se encuentran fundamentados en formularios o simples herramientas sin opciones de apoyo metodológico.

El tiempo de medición es alto debido a los obstáculos y dependiendo de la experiencia que posea el evaluador la calidad puede verse afectada, es por ello que hoy en

día se buscan nuevas opciones para mejorar los procesos de medición (PEÑA SOTOMAYOR; ZÁRATE TORRES, 2020).

Actualmente varias de las metodologías empleadas para el control de calidad del pavimento no están direccionadas a cuantificar la cantidad de “ejecuciones deficientes” y sus posibles perjuicios, ni así mismo proponer alternativas para las tomas de decisión (FERRI et al., 2017).

En otros escenarios latinoamericanos por ejemplo, Colombia utiliza el Manual para la Inspección Visual de Pavimentos flexibles del INVIAS (Instituto Nacional de Vías) bajo este contexto de evaluación de elementos constructivos.

Una herramienta metodológica que tenga en cuenta las características de la carretera que contribuyen al deterioro del pavimento y proporcione un procedimiento simple de recolección de datos puede ayudar a los administradores del pavimento a establecer las condiciones en las que se encuentra el pavimento y las prioridades de mantenimiento de manera más rápida, confiable y rentable (SALVIATTO; FONTENELE, 2021).

De entre los diversos métodos y herramientas conocidas que dan apoyo a la toma de decisión en complejos escenarios de planificación, Analytic Hierarchy Process (AHP) se encuentra entre las herramientas más conocidas y difundidas (HEINRICH et al., 2021).

La concepción metodológica de este trabajo consiste en obtener parámetros e indicadores que definan las condiciones de circulación de la vía como demanda del usuario por medio de un modelo multicriterio, dejando de lado el análisis de la parte interna estructural y causas probables del surgimiento de las manifestaciones patológicas de la vía, que no va a ser analizado en este trabajo.

Abordar inspección de pavimentos bajo a la premisa de evaluación multicriterio no se encuentra de forma frecuente en la literatura, este tipo de análisis da una perspectiva más amplia de los posibles problemas que se enfrentan y las alternativas para evaluar las posibles soluciones al alcance, realizando un análisis detallado con las herramientas adquiridas. Siendo de esta manera un apoyo para la gestión pública, facilitando y mejorando el análisis de manifestaciones patológicas en las vías urbanas.

Las inspecciones visuales son indispensables y el producto obtenido brinda una respuesta fidedigna acerca del estado de conservación de la vía, con el avance tecnológico esto ha ganado apoyo para su realización. Los vehículos aéreos no tripulados tienen dentro de sus características la toma rápida de datos y la movilidad en zonas inaccesibles (PARENTE; FELIX; PICANÇO, 2017).

Aunque aún no se ha estandarizado el uso de dispositivos electrónicos no tripulados

como herramienta de control, existen varios estudios que intentan revelar un método, pero para ello es necesario desarrollar investigaciones que validen estos métodos desarrollados (TONDELO; BARTH, 2019).

Gracias a estos avances, los drones se pueden utilizar para aumentar la capacidad de vigilancia o intervención desde lugares o espacios de difícil acceso, o que simplemente ponen en riesgo vidas (HERRERA et al., 2019). Se trata de una alternativa flexible y económica para la obtención de datos sobre deterioros de las vías (PEÑA SOTOMAYOR; ZÁRATE TORRES, 2020).

Tanto en Brasil como en otros países, el uso de estos dispositivos en ambientes civiles es cada vez más común, como la agricultura, la silvicultura, la arqueología, la arquitectura y la ingeniería civil (BALLESTEROS; LORDSLEEM JUNIOR, 2021).

La utilización de imágenes de fallas superficiales obtenidas por medio de vehículos aéreos no tripulados es propicia para la detección temprana del deterioro precoz del pavimento. De igual manera es exigente con respecto a la delimitación geométrica de la manifestación patológica. Emplear drones permite obtener un resultado de alta resolución por la rapidez y precisión que posee el aparato (PEÑA SOTOMAYOR; ZÁRATE TORRES, 2020).

Los sistemas de información geográfica (conocidos comúnmente como SIGs) son un activo importante en la representación gráfica de carreteras en una determinada zona. La presentación de información admite en una determinada red o proyecto, con sistemas de color o condiciones especiales. Establecer la necesidad o el estado que se requiere, y establecer en un cierto tipo de "cuaderno" una estructura de información (geodatabase) que muestra su condición específica (SILVA-BALAGUERA; LEGUIZAMÓN; VALIENTE, 2018).

Los sistemas de información geográfica son un sistema técnico que recopilan, almacenan, calculan, gestionan, analizan, muestran y describen datos geográficos importantes para su totalidad o parte de la superficie terrestre (LI et al., 2018). Alrededor del mundo es utilizada cada vez más la aplicación de sistemas de información geográfica para el mapeo y gerenciamiento del estado de las vías urbanas (PESCADOR JUNIOR; DA SILVA JUNIOR; FONTENELE, 2018).

Las técnicas de aplicación de geoprocésamiento son de gran utilidad en la planificación urbana, ya que combina acciones que permiten una representación visual de datos espaciales relacionados, estáticos y textuales a partir de una base de datos georreferenciada (FELIZARDO, 2016).

La técnica de mapas de calor del SIG se basa en coordenadas geográficas

espaciales que forman una capa con información de ubicación de coordenadas a través de atributos de distribución jerárquicos incorporados de los datos. Esta capa se puede superponer fácilmente con cualquier dato de coordenadas geográficas para proporcionar un análisis superpuesto de datos de múltiples fuentes y es de gran ayuda en la investigación en ingeniería (LI et al., 2018).

Finalmente, bajo estas premisas de estudio, se puede inferir que es posible medir el grado de conservación y mantenimiento de las vías urbanas a partir de un índice de evaluación bajo un modelo multicriterio asociado a sus manifestaciones patológicas. La dificultad para realizar un plan de inspección y modelo de evaluación de pavimentos flexibles en vías urbanas supone la necesidad del desarrollo de una metodología que indique el grado de deterioro de la capa de rodamiento. Y la necesidad de crear un índice de deterioro patológico que integre cada una de las manifestaciones patológicas, así como la incorporación de herramientas tecnológicas al momento de realizar la inspección.

Este trabajo se justifica a partir de la construcción de conocimiento en aras de mejorar el manual actual de la DNIT, buscando un modelo que incorpore indicadores, con rigor científico y que permita observar el grado de deterioro a través del uso de tecnologías, con la representación por mapeamientos con los Sistemas de Información Geográfica (SIGs) para así obtener el índice de deterioro patológico (IDP), todo esto como herramienta esencial para un levantamiento de manifestaciones patológicas.

Bajo este contexto, este trabajo de conclusión de curso plantea, por un lado, desarrollar una propuesta de modelo de inspección, así como también potenciar la utilización de herramientas tecnológicas, tales como los dispositivos electrónicos no tripulados en yuxtaposición del empleo de sistemas de información geográfica en virtud de su representación visual.

1.1. OBJETIVO GENERAL

El objetivo general del presente trabajo de conclusión de curso se centra en desarrollar una propuesta de modelo multicriterio de inspección y medición de deformaciones superficiales en pavimentos flexibles que permita orientar las actuaciones correctivas en la administración pública.

1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

A continuación, se presentan los objetivos secundarios o específicos que permiten construir la propuesta metodológica de evaluación en pavimentos, producto

de este trabajo de fin de curso.

1. Revisar la bibliografía y experiencias internacionales relacionadas a los modelos de inspección y evaluación de pavimentos flexibles, así como también las distintas metodologías de levantamiento de manifestaciones patológicas en vías urbanas.
2. Identificar las características y parámetros principales que intervienen en la evaluación de pavimentos, las manifestaciones patológicas que ocurren en los principales centros urbanos, en aras de construir una herramienta metodológica que permita inspeccionar, analizar y evaluar el grado de deterioro en un pavimento flexible.
3. Realizar el levantamiento de las manifestaciones patológicas estudiadas por medio de dispositivos electrónicos no tripulados en las principales vías urbanas de la ciudad de Foz de Iguazú.
4. Representar las manifestaciones patológicas y determinar el índice de deterioro patológico (IDP) a través de mapas de calor utilizando los sistemas de información geográfica.

1.3. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Como ya se ha mencionado anteriormente, este trabajo de conclusión de curso se centra en la inspección y evaluación de pavimentos flexibles en vías urbanas a través la teoría de decisión utilizando un modelo multicriterio.

Con respecto a las limitaciones metodológicas y normativas, se ha utilizado los fundamentos de teoría de la decisión, el modelo del proceso de jerarquía analítica (AHP) así como también la normativa Brasileña del *Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes* integradas en el *Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos*, e internacionales como *The Distress Identification Manual* perteneciente a la FHWA (*Federal Highway Administration*) e INVIAS (Instituto Nacional de Vías) relacionados a inspección de pavimentos en vías urbanas.

Con respecto a las limitaciones técnicas y tecnológicas se ha definido el uso de dispositivos electrónicos no tripulados (Drone Mavic DJI) con vuelos realizados a alturas de 20 metros con respecto al pavimento flexible.

Por otro lado, se han utilizado sistemas de información geográfica (SIGs) como un medio visual y de caracterización de los grados de deterioro (mapas de calor) en cada una de las manifestaciones patológicas.

Se ha realizado la revisión e identificación de manifestaciones patológicas en entornos urbanos teniendo en cuenta los parámetros internacionales que permiten gestionar los diversos grados de deterioros presentes en la capa de rodamiento.

Con respecto a los límites geográficos, se ha definido el estudio para la ciudad de Foz de Iguazú en el estado de Paraná (Brasil). Se han estudiado un total de 15 manifestaciones patológicas que intervienen y afectan de forma directa en la durabilidad del pavimento, comodidad de tránsito y sobre todo en la seguridad de trayecto.

1.4. ESTRUCTURA DEL TRABAJO

Con el fin de cumplir con lo propuesto en los objetivos se presenta como se encuentra definida la estructura del trabajo en los siguientes capítulos:

En el **capítulo 1**, referente a la Introducción, se expresa la justificación del presente estudio dentro de la introducción y aspectos generales del tema, descripción del objetivo general y los objetivos específicos a ser alcanzados, y por último la estructura en la que será desarrollada la línea de trabajo.

En el **capítulo 2**, se presenta el estado del conocimiento, donde se contextualiza el estudio en la narrativa teórica de pavimento flexible, las vías urbanas, fallas superficiales, la metodología multicriterio y los dispositivos electrónicos no tripulados aplicados a la ingeniería civil.

De la misma forma, se integran conceptos asociados a los distintos sistemas de información geográfica en aras de construir conocimiento ante la perspectiva de creación de mapas de calor en sus distintas manifestaciones patológicas.

En el **capítulo 3**, define la propuesta metodológica, examinando las tareas y etapas aplicadas. Se enfatiza el desarrollo de la metodología multicriterio para así, representar las etapas de levantamiento de información en campo.

En el **capítulo 4**, se presenta el estudio de caso realizado en la ciudad de Foz do Iguazú, con los elementos obtenidos en la etapa de levantamiento de datos y límites del estudio.

En el **capítulo 5**, se expresan los resultados y discusión relacionados al estudio desarrollado a partir del estudio desarrollado de forma global.

El **capítulo 6**, muestra las conclusiones generales y particulares inherentes a este trabajo de conclusión de curso.

Finalmente, en el **capítulo 7**, presentan las referencias bibliográficas de la literatura para el desarrollo de este trabajo de conclusión de curso.

2 CAPITULO: ESTADO DEL CONOCIMIENTO

En el Capítulo 1 se han reflejado de forma sucinta los antecedentes, objetivos, limitación y estructura del trabajo de conclusión de curso en el área de transportes. Si bien, las principales directrices de la investigación han sido definidas, es necesario desarrollar un cuadro teórico que defina los conceptos y los fundamentos teóricos del modelo multicriterio que evalúe y diagnostique pavimentos flexibles.

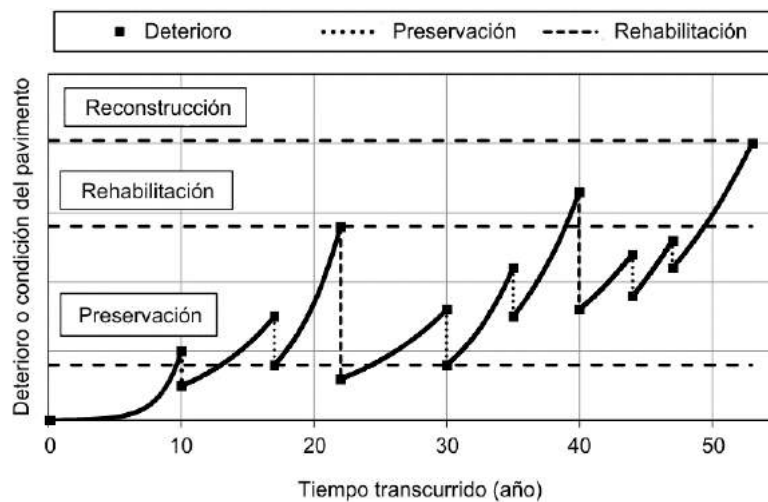
En este contexto, esta sección describe acerca la capa de rodamiento y las fallas superficiales, así como el empleo de tecnologías para su diagnóstico mediante el uso de dispositivos electrónicos no tripulados y sistemas de información geográfica. El presente capítulo concluye con una breve descripción acerca de la aplicación de sistemas de información geográfica en el área de la ingeniería civil, con la obtención de mapas de calor.

2.1. PAVIMENTOS

Los pavimentos son estructuras destinadas a volver más fluido el movimiento de mercaderías y personas, su vida útil depende de una serie de factores físicos y mecánicos de las capas que lo constituyen (MOLIN et al., 2018). El objetivo principal de la superficie de rodadura es que sea cómoda, económica y que brinde seguridad a los usuarios, permitiendo una circulación segura y satisfactoria para vehículos y pedestres (ALVES; FERNANDES; BERTEQUINI, 2018; BENITEZ; INTRIAGO, 2020; OLIVEIRA; SALOMÃO; BARBOSA, 2022).

Dentro de la clasificación de los pavimentos: se encuentran los pavimentos rígidos, semirrígidos y flexibles (CAVALET et al., 2019; SILVA et al., 2018). Los pavimentos rígidos son conocidos como pavimentos de concreto y en su ejecución se utiliza cemento Portland (MOHOD; KADAM, 2018). A diferencia de los pavimentos flexibles, que utilizan una capa asfáltica en la superficie (PÉREZ-ACEBO et al., 2020). Estos pavimentos se diferencian uno del otro en la absorción de impactos (CASTRO et al., 2016).

Figura 2. Condición típica del pavimento durante su ciclo de vida.



Fuente: Adaptado según (BALADI et al., 2017)

2.1.1 Pavimentos Flexibles

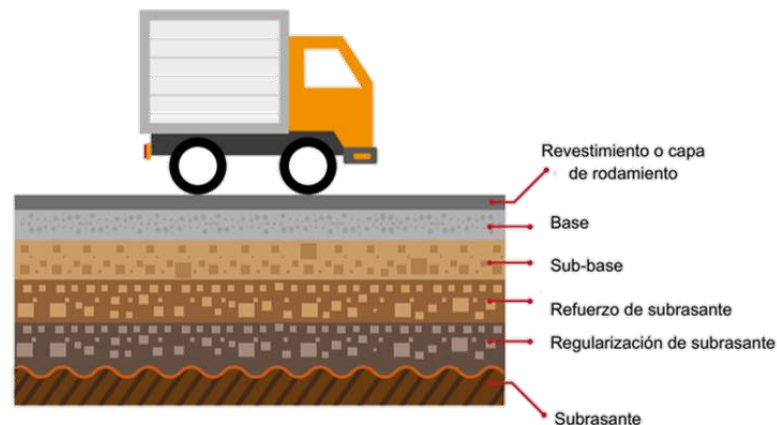
De Almeida (2017) define el pavimento flexible como una superficie con revestimiento asfáltico y una capa de base granular, en la que la distribución de esfuerzos y deformaciones causadas a la estructura por las cargas de las ruedas del tráfico se produce de tal manera que las fuerzas verticales de compresión son mitigadas por el revestimiento y las capas en el subsuelo al "absorber" los esfuerzos cortantes.

Estructuralmente, la capa asfáltica es la encargada de absorber esfuerzos horizontales y una parte de los esfuerzos verticales, debido a que las cargas producidas por los vehículos se distribuyen hacia las demás capas, las bases y subbases (MEZA; PIUSSEAUT, 2019).

La composición estructural del pavimento incluye la determinación de las dimensiones y disposición de espesores de los diferentes materiales que soportarán las cargas producidas por el tráfico y las condiciones climáticas a las que estará expuesta la estructura del pavimento en lo que dure su vida útil (DÁVILA; NAVARRETE; REA, 2018).

En la **Figura 3** se presenta la sección transversal típica del pavimento flexible, donde se observan las capas que trabajan en conjunto, siendo compuesta por la capa de rodamiento (o carpeta asfáltica), la base posicionada sobre la subbase que normalmente es compuesta por materiales granulares, luego se encuentran el refuerzo y regularización de la subrasante, y finalmente todo esto sobre el suelo natural al cual se denomina la subrasante.

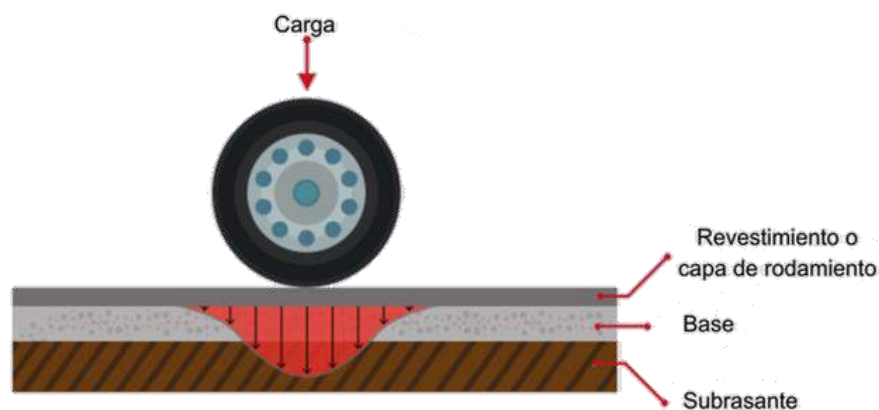
Figura 3. Sección transversal típica de pavimento flexible.



Fuente: Adaptado según CNT (2017).

En la **Figura 4** se observa la deformación elástica en el pavimento flexible por la carga recibida. La capa que recibe directamente la carga de los vehículos es la capa de revestimiento, la cual debe ser lo más impermeable posible y resistente a las fuerzas de contacto entre las ruedas y el pavimento en movimiento (MENDES, 2019). El desempeño de esta capa se debe a las propiedades de sus materiales individuales, así como a la relación entre el agregado y el aglomerante (DE CARVALHO et al., 2016).

Figura 4. Deformación elástica por la carga en el Pavimento flexible.



Fuente: Adaptado según CNT (2017).

2.2. MOVILIDAD URBANA

De acuerdo con De Paula y Bartelt (2016), la movilidad urbana se define como un conjunto de atributos de un sistema de transporte que permite el transporte de individuos o bienes de un lugar a otro y cuya calidad de eficiencia se evalúa en función de la velocidad y seguridad de flujo vehicular. En otros términos, la movilidad urbana hace referencia a la capacidad de las vías y medios de transportes de una ciudad en satisfacer las necesidades

de desplazamiento de sus habitantes, garantizando una movilidad ágil, segura y sostenible.

Actualmente, tanto para el Brasil como para el resto de los otros países, la movilidad urbana es un aspecto fundamental debido al crecimiento acelerado de la población brasileira (OLIVEIRA; SALOMÃO; BARBOSA, 2022), lo que ha llevado a un aumento demográfico, social y económico, generando necesidades como sistemas de transportes eficientes y adecuados.

La movilidad urbana no se limita al desplazamiento dentro de la ciudad, sino que abarca múltiples aspectos, tales como la mejora de la calidad de vida, la utilización consciente del espacio público y la valoración del ambiente urbano (DE PAULA; BARTELT, 2016).

La extensión total de la red vial brasileña es de 1.720.756 km, donde solamente el 12.3% se encuentra pavimentado. Además, se observa que el 78.6% de la red vial está constituido por carreteras sin pavimentar, mientras que solo el 9.1% corresponde a carreteras planificadas como se puede apreciar en la **Figura 5**.

Figura 5. Extensión de la red vial brasileira



Fuente: Adaptado según (CNT, 2016).

La calidad de la movilidad urbana es afectada por la falta de recursos financieros del poder público destinados al mantenimiento de los pavimentos (OLIVEIRA; SALOMÃO; BARBOSA, 2022). La condición de la superficie del pavimento está directamente relacionada al desempeño del transporte y la economía del Brasil. Vías en deplorables condiciones aumentan los costos operacionales del transporte, disminuyen el confort y la seguridad de los usuarios y cargas, además de contribuir a la degradación del medioambiente (CNT, 2017).

La capa asfáltica ha sido ampliamente empleada en la construcción de carreteras, especialmente en autopistas de alta velocidad, debido al viaje confortable que brindan, durabilidad, economía y reaprovechamiento (PAN et al., 2021). En el Brasil, la red vial atiende aproximadamente el 95% del transporte de personas y al 61% del transporte de cargas (CZRNHAK; HUBER; DUSI, 2019).

La red vial está sujeta al deterioro estructural debido a la degradación de los materiales causada por el intenso tráfico, las condiciones climáticas adversas, la obsolescencia, la deficiente calidad de construcción y la carencia de un mantenimiento adecuado (RANYAL; SADHU; JAIN, 2022).

2.2.1. Sistema de Transporte

La infraestructura de transporte terrestre, y principalmente la infraestructura de carreteras, es esencial para el progreso económico y social de cualquier sociedad (ORTIZ-CARRILLO et al., 2018; PAN et al., 2021; ZHANG et al., 2019).

Los beneficios del transporte por carretera en relación a los otros medios de transporte son la eficiencia y la velocidad de entrega de las mercaderías así como la grande área de cobertura ofrecida por la red de carreteras, sin embargo las limitaciones que posee están relacionadas a la falta de capacidad para el transporte de grandes cantidades de materiales y el alto costo que posee el transporte a larga distancia (JOIA; PAIXÃO, 2016).

En las últimas décadas del siglo XX, las ciudades brasileñas han experimentado un alto crecimiento demográfico, lo que ha ejercido una fuerte presión en las demandas de transporte urbano (LESSA; LOBO; CARDOSO, 2019).

La infraestructura de transporte actual en Brasil es obsoleta y con muchas interrupciones, siendo el transporte por carretera uno de los sectores con mayor déficit en la entrega del producto final (CHIARELLO et al., 2019).

La eficiencia de un sistema de transporte rodoviario está directamente relacionada a la calidad de conducción y comodidad ofrecida durante el desplazamiento, por lo cual es crucial la identificación precoz de fallas y posterior mantenimiento (RANYAL; SADHU; JAIN, 2022).

2.2.2. Desarrollo económico y social

Las vías urbanas son esenciales para el progreso social y económico de las ciudades, ya que proporcionan una mejor movilidad urbana y mejoran los medios de transporte (GOMES et al., 2022).

La pavimentación es un componente crucial de la infraestructura vial de cualquier país, ya que contribuye de manera significativa al crecimiento económico, facilitando la circulación de personas y mercancías (CAVALET et al., 2019).

La presencia de vías urbanas en buen estado mejora el acceso a diferentes puntos de la ciudad, lo que conlleva a un impacto positivo en la calidad de vida de las personas y en el desarrollo económico de la ciudad.

Según la CNT (2022) con una infraestructura sólida es posible mejorar la eficiencia y competitividad de las empresas, es decir, producir más bienes, impulsar la economía local, crear empleos y acelerar el progreso económico y social del país.

Para garantizar la eficiencia y la economía de los costos operaciones de los vehículos, es fundamental realizar inspecciones con regularidad para evaluar el estado actual en la que se encuentra la superficie asfáltica y realizar mejoras cuando necesario (SHON; LEE, 2021).

La escasez de recursos destinados a la conservación de las vías se traduce en la calidad de movilidad urbana, particularmente cuando se detecta anomalías en las vías urbanas, tales como deformaciones, desgastes, hoyos, falta de señalización, hasta la carencia de pintura del pavimento (GOMES et al., 2022).

2.3. FALLAS SUPERFICIALES

Los pavimentos asfálticos deben promover comodidad y garantía de condiciones de tránsito, cuando esto no ocurre, surgen las primeras señales de patologías que generan disturbios y disminuyen el tiempo de vida (SILVA et al., 2021). El deterioro de la vía comienza inmediatamente luego de la apertura. Este proceso comienza tan lentamente que puede ser imperceptible, incrementándose de forma acelerada a lo largo del tiempo (ZUMRAWI, 2020).

Los defectos en los pavimentos flexibles se reflejan en daños a la superficie de rodadura y pueden ser causados por imperfecciones en la construcción, por acciones del medio ambiente y por las exigencias impuestas por el tránsito (BHANDARI; LUO; WANG, 2022; RANYAL; SADHU; JAIN, 2022; SEGRE, 2019).

La calidad de la carpeta asfáltica se ve afectada por diferentes tipos de degradación y sus severidades (HERRERA SUAREZ; CHAHUARES PAUCAR, 2021). El daño superficial de los pavimentos, ya sean flexibles o rígidos, se debe principalmente al deterioro de su estructura ya sea por factores climáticos, empleo de materiales deficientes o flaqueza en la estructura (PEÑA SOTOMAYOR; ZÁRATE TORRES, 2020).

Figura 6. Vía urbana con signos de deterioro por manifestaciones patológicas.



Fuente: Autora (2023).

La **Figura 6** ilustra una vía urbana que presenta signos evidentes de deterioro, donde se observan manifestaciones patológicas tales como fisuras en bloque, fisuras transversales y longitudinales.

El deterioro del pavimento tiene una fuerte pendiente cerca del 17% de su ciclo final, sin embargo, se llega a prolongar la vida útil del pavimento si se realizan los mantenimientos constantes en la fase inicial. Comparando con el costo de mantenimiento el promedio de costos van desde una a ocho veces una rehabilitación y de una a tres veces una reconstrucción, sin mencionar que realizando el mantenimiento se alcanza un mejor estado del pavimento (SILVA-BALAGUERA; LEGUIZAMÓN; VALIENTE, 2018).

Las patologías de los pavimentos flexibles se pueden clasificar en defectos funcionales y estructurales. Una falla funcional es aquella que pone en peligro las buenas condiciones de conducción de la pista, es decir, la comodidad y seguridad del usuario con relación al deslizamiento. Un defecto estructural es aquel que amenaza la capacidad del pavimento para soportar las cargas causadas por el tráfico, es decir, la estructura del pavimento (DE CARVALHO et al., 2016).

Recientemente, el comportamiento estructural de los pavimentos flexibles se ha visto comprometido por el incremento del flujo vehicular y el exceso de cargas, provocando un deterioro precoz y, a su vez aumentando los costos operacionales de los vehículos y de rehabilitación de la red vial (VALE; PAIS, 2017).

Para determinar las prioridades de mantenimiento dentro de la red de vías urbanas, es crucial la aplicación de métodos de evaluación del estado funcional y estructural del pavimento, así como monitorear el desempeño de la vía (VIEIRA et al., 2016).

Alrededor del 60% de la red vial brasileña tiene alguna manifestación patológica, es

decir, fallas que afectan la parte superior e inferior del pavimento, causando daños a la estructura del eje viario (SILVA et al., 2021).

Actualmente se recomienda analizar por separado los requerimientos de las condiciones funcional y estructural de un pavimento al momento de mantener y diseñar una vía, ya que no necesariamente se encuentran relacionados (THENOUX; GARNICA, 2019).

La falta de inversión en infraestructura urbana puede afectar negativamente la calidad y durabilidad del pavimento de las vías urbanas. Según Lázaro et al., (2022), expertos del área de ingeniería de transportes debaten actualmente la elaboración de investigaciones para evaluar el estado de los componentes de la infraestructura vial, donde se destacan los pavimentos urbanos.

El mantenimiento de las vías urbanas a menudo se realiza sin una planificación adecuada, lo que resulta en un incremento del deterioro del pavimento y un aumento de costos para los usuarios y la gestión pública (PEREIRA; SILVA JÚNIOR; FONTENELE, 2019). Por esta razón, se ha hecho necesaria la aplicación de herramientas innovadoras para la toma de decisiones garantizando una gestión eficiente y adecuada (BABASHAMSI et al., 2016).

2.4. METODOLOGÍA MULTICRITERIO

La toma de decisiones multicriterio es un área de estudio de investigación operativa que tiene por objetivo estudiar y desarrollar métodos y procedimientos que permitan abordar el proceso de tomar decisiones cuando se tienen que considerar varios criterios diferentes que pueden entrar en conflicto (NANTES, 2019).

La toma de decisiones puede ser complicada cuando varios factores necesitan ser considerados. Herramientas de análisis multicriterio pueden ser bastante útiles en este contexto, ya que pueden ayudar a tener una visión más clara y completa sobre la situación. Estas herramientas permiten evaluar y comparar diferentes escenarios o alternativas con base en varios criterios, facilitando la identificación de la mejor opción posible (SALVIATTO; FONTENELE, 2021).

La ausencia de métodos rápidos y automatizados de monitoreo de carreteras es un factor importante que contribuye a la aparición de daños en el pavimento, y es un problema que ocurre en muchos países, lo que exige grandes esfuerzos en esta área (RANYAL; SADHU; JAIN, 2022). La identificación y supervisión de los deterioros del pavimento son vitales para evaluar la condición actual de la infraestructura urbana y para encontrar soluciones de mantenimiento viables (ZHANG et al., 2019).

La utilización del método de toma de decisiones multicriterio dentro de la gestión de la infraestructura civil está avanzando globalmente. La industria de la construcción presentó un significativo desenvolvimiento al incorporar criterios diversos y potencialmente contradictorios en las tomas de decisiones (DABOUS et al., 2019).

En la **Tabla 1** se enumeran algunas de las diversas aplicaciones descritas en la literatura que están relacionadas con el método multicriterio. Cada uno incluyen características relevantes en su estructura principal y avances metodológicos específicos adaptados a cada caso.

Tabla 1. Aplicación del Método Multicriterio.

Área de aplicación	Atributos de la aplicación	Autores
Gestión de Infraestructura	Método de toma de decisiones en la gestión de red de agua potable.	VERDUZCO; GARATUZA; DÍAZ, (2015)
Energías renovables	Construcción de plantas de energía fotovoltaica.	GARCIA-BERNABEU et al., (2016)
Ingeniería Civil	Evaluación del rendimiento de diques en ríos por medio del método multicriterio probabilístico.	VUILLET et al., (2016)
Infraestructura de Transporte	Evaluación multicriterio de proyectos de transporte.	JAKIMAVICIUS; BURINSKIENE; GUSAROVINE, (2017)
Mantenimiento de edificios	Concepción del tiempo de retraso para definir una política de inspección de mantenimiento.	CAVALCANTE; ALENCAR; LOPES, (2017)
Accesibilidad peatonal	Evaluación de la accesibilidad de peatones considerando diferentes grupos y motivos de viaje.	MOURA; CAMBRA; GONÇALVES, (2017)
Diseño de construcciones	Selección de soluciones de diseño optimas.	ARROYO et al., (2018)
Gestión de Servicios TI	Modelo de soporte de decisiones de TI.	LIMA et al., (2018)
Transporte marítimo	Adquisición de tecnologías de reducción de emisiones en el sector marítimo.	ASPEN; HASKINS; FET, (2018)
Urbanismo Sostenible	Construcción de un índice ponderado de movilidad basado en atributos del entorno peatonal.	RUIZ-PADILLO et al., (2018)
Ingeniería de	Evaluación de sostenibilidad de	TORRES-MACHI et al.,

pavimentos	alternativas de ingeniería de pavimentos.	(2019)
Límites de velocidad	Uso de lógica difusa en las tomas de decisión multicriterio.	LANZARO; ANDRADE, (2020)
Infraestructura Vial	Gestión de mantenimiento de pavimentos flexibles.	KILIĆ PAMUKOVIĆ et al., (2020)
Diseño de ingeniería	Selección de diseños óptimos en función de la importancia relativa de las características del diseño.	OLABANJI; MPOFU, (2020)
Educación	Aprendizaje con la aplicación de realidad virtual.	TRY et al., (2021)

Fuente: Autora (2023).

Una herramienta de análisis que lleve en consideración el deterioro de la vía urbana y ofrezca un procedimiento simple de recolección de datos puede auxiliar a los gestores en la toma de decisión acerca de la condición del pavimento y la prioridad de mantenimiento de una forma más simple, confiable y con menor costo (SALVIATTO; FONTENELE, 2021).

Tomar decisiones que engloban múltiples objetivos y la necesidad de atender a varios criterios como en el caso de gerenciamiento de pavimentos presenta una naturaleza compleja. Es en ese contexto que la aplicación del análisis de decisión multicriterio puede ofrecer un soporte en la toma de decisión, permitiendo la evaluación cuantitativa de diversas variables. El método multicriterio posibilita la integración de diferentes criterios en una evaluación global, que pondera la importancia de cada criterio en la decisión final (DABOUS et al., 2019).

En su investigación Lázaro et al., (2022) afirma que en campo la combinación de técnicas de investigación, sensoramiento remoto, levantamiento veloz, geoprocuremento y análisis espacial, posibilitó la creación de un sistema de evaluación del estado de la condición superficial de los pavimentos en las vías urbanas de forma georreferenciada y también multidisciplinaria.

Con un índice de inspección visual obtenido por medio del modelo multicriterio son analizados los criterios que afectan a la vía, esos criterios son definidos dependiendo del nivel de incomodidad que generan ya sea en el ámbito del confort, en la parte superficial o en la estructural, a partir de los indicadores son estudiadas e indicadas las manifestaciones patológicas que se encuentran en las vías urbanas. El nivel de intervención para una toma de decisión al respecto de la vía dependerá del índice de gravedad de la manifestación patológica analizada.

Dentro del contexto mencionado se consideran criterios y requisitos necesarios para

generar un valor en dicho indicador, este valor nos expresa el nivel del deterioro de la capa de rodamiento, se adopta la metodología descrita a consecuencia del auxilio que brinda a partir del problema y la respuesta que debe ser generada.

El apoyo que genera el modelo multicriterio a la creación y obtención de un índice que mida el nivel de deterioro de la manifestación patológica en la capa de rodamiento se prosigue a poner en práctica este modelo, aplicando por su vez un sistema de información geográfica sobre las vías.

En el campo de pavimentos asfálticos no se han encontrado otras experiencias que apliquen modelos multicriterio de inspección y evaluación de pavimentos por lo cual este trabajo aporta un gran valor científico en la configuración de nuevos métodos de inspección.

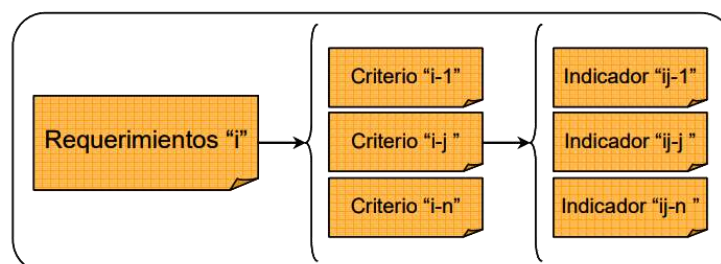
2.4.1. Analytic Hierarchy Process (AHP)

El método Analytic Hierarchy Process (AHP) creado por Thomas Saaty en la década de 1980. Este método auxilia en la toma de decisiones, ayuda en situaciones donde existen varios criterios para analizar utilizando la comparación de datos en pares a través de una escala. Dentro de esta escala es posible representar la preferencia de un criterio frente al otro (NANTES, 2019).

Este método utiliza un proceso matemático para atribuir valores de importancia a diferentes criterios y opciones, mediante una matriz de comparación de pares. En esta matriz, cada elemento se compara con los demás del problema, ya sea criterio u opción, para determinar su importancia relativa. Luego se calcula el auto vector asignado al autovalor dominante para obtener una medida final de la importancia de cada criterio y opción (VALERA, 2015).

En la **Figura 7** se muestra la estructura jerárquica de un problema, donde en primer lugar se presenta el objetivo del problema. En el segundo nivel se encuentran los criterios junto con su ponderación. Cada criterio incluirá uno o varios indicadores, que constituyen el último nivel del modelo.

Figura 7. Esquema de la estructura jerárquica del problema



Fuente: VILLEGAS (2009)

Dentro del AHP el nivel de ponderación es obtenido a partir de los pesos relativos, en la **Tabla 2** se observa la escala numérica utilizada para calificar los indicadores y criterios. Donde luego de montar nuestra matriz de comparación, suponiendo que se tiene un valor n de indicadores se realiza la comparación por pares, en donde el primer indicador es el que posee un mayor valor de importancia frente al siguiente indicador.

Tabla 2. Escala fundamental de números absolutos.

Importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos actividades contribuyen por igual al objetivo.
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente una actividad sobre otra.
5	Fuerte Importancia	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre otra.
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Una actividad se ve fuertemente favorecida sobre otra, demostrada en práctica.
9	Importancia extrema	La evidencia que favorece una actividad sobre otra es del más alto orden de afirmación posible
2, 4, 6, 8	Valores Intermedios	

Fuente: Adaptado según (SAATY, 2004)

El método AHP consiste en estructurar y comparar los elementos del problema en una jerarquía y analizar la lógica entre los resultados. Para ello, son creadas matrices cuadradas simétricas inversas para cada grupo de atributos (matrices de tamaño $n \times n$, donde “ n ” es el número de elementos de la matriz) en las cuales cada valor dentro de la matriz indica la importancia relativa de un atributo sobre el otro (RUIZ-PADILLO et al., 2018).

Determinar la importancia relativa de los diferentes indicadores en función de su relación entre si es un proceso que deriva de la escala de importancia relativa. En la **Tabla 3** se construye una matriz de comparación por pares en donde se realizan juicios, al ser una matriz de orden n se establecen $\frac{n(n-1)}{2}$ juicios. En cada posición de la matriz, el valor del Indicador de la izquierda es comparado con el Indicador de arriba y se coloca la

ponderación.

Tabla 3. Estructura recíproca de la matriz de comparación por pares para indicadores.

matriz de comparación	Indicador 1	Indicador 2	Indicador 3	Indicador n
Indicador 1	S_1/S_1	S_1/S_2	S_1/S_3	S_1/S_n
Indicador 2	S_2/S_1	S_2/S_2	S_2/S_3	S_2/S_n
Indicador 3	S_3/S_1	S_3/S_2	S_3/S_3	S_3/S_n
Indicador n	S_n/S_1	S_n/S_2	S_n/S_3	S_n/S_n

Fuente: Adaptado según (SAATY, 2004)

El método de cálculo de los vectores de ponderación definidos en el método AHP es aproximado, pues en la práctica el encargado de tomar decisiones puede cometer algunas inconsistencias al estimar las comparaciones de importancia relativas en pares (RUIZ-PADILLO et al., 2018). El índice de consistencia indicará la necesidad de mejorar los juicios o restablecer la jerarquía, teniendo en cuenta que la consistencia es perfecta cuando los juicios se relacionan entre sí de forma coherente (DÍEZ, 2015).

Irreño y aguilar (2018) afirman que el índice de consistencia es un proceso por el cual se puede comprobar la exactitud de las evaluaciones aplicadas en las matrices. Primeramente, se toma el promedio de las puntuaciones obtenidas en la matriz normalizada, luego se crea una nueva matriz sin normalizar y se multiplica por un vector de pesos que se ha asignado a cada opción, y finalmente los resultados obtenidos son divididos por el promedio. Se calcula el promedio de resultados obtenidos de esta división y se aplica la Ecuación 1:

$$IC = \frac{n_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \quad (1)$$

Donde:

IC : Índice de Consistencia;

$n_{m\acute{a}x}$: Valor del promedio;

n : Cantidad de opciones evaluadas.

El índice de consistencia indicará si las evaluaciones aplicadas son coherentes y

confiables. El valor del índice no puede ser mayor que 0.1, si ocurre esto se deben revisar los valores de la matriz (IRREÑO; AGUILAR, 2018).

Montiel, Ortega y Sarmiento (2018) afirman que RI es el índice de consistencia aleatoria de una matriz de comparaciones en pares generada de forma aleatoria. Algunos autores sugieren la siguiente estimativa para RI :

$$RI = \frac{1.98 (n - 2)}{n} \quad (2)$$

Donde:

RI : Índice de Consistencia Aleatoria;

n : Cantidad de opciones evaluadas.

La razón de coherencia es la relación entre el índice de consistencia y el índice de consistencia aleatoria, el valor no debe ultrapasar 0.1, en caso de que esto suceda podría ser un error de cálculo o tal vez una incoherencia en los pesos asignados en la matriz (MONTIEL; ORTEGA; SARMIENTO, 2018).

$$CR = \frac{IC}{RI} \quad (3)$$

Donde:

CR : Razón de Coherencia;

RI : Índice de Consistencia Aleatoria;

IC : Índice de Consistencia.

2.5. DISPOSITIVOS ELECTRONICOS NO TRIPULADOS

Los dispositivos electrónicos no tripulados son una herramienta valiosa para científicos y profesionales que necesitan una toma de decisión rápida (ZEYBEK; BIÇICI, 2020). Comúnmente conocidos como drones, estos dispositivos voladores de pequeñas dimensiones pueden ser controlados de forma remota o funcionar de manera autónoma (TORIBIO; LAZARES, 2019).

El avance de la tecnología ha propiciado el uso de nuevas técnicas de monitoreo, con la llegada de nuevos métodos de captura de imágenes ha evolucionado la supervisión de carreteras basada en imágenes, uno de los recursos más destacados es el empleo de dispositivos electrónicos no tripulados (DADRASJAVAN; ZARRINPANJEH; AMERI, 2019).

El uso de drones permite capturar imágenes de alta resolución en lapsos cortos de tiempo y con un costo menor que los métodos tradicionales (ROBERTS; INZERILLO; DIMINO, 2020). Son capaces de ofrecer imágenes de alta resolución en tiempo casi real, muchas veces a un costo menor que de las plataformas tripuladas en el aire o en el espacio (SCHNEBELE; TANYU; WATERS, 2015).

En los últimos años, se han llevado a cabo diversas investigaciones utilizando dispositivos electrónicos no tripulados como medio de inspección visual, principalmente para diversos elementos de infraestructura (BALLESTEROS; LORDSLEEM JUNIOR, 2021). La ingeniería de transportes ha adoptado esta herramienta para la recopilación de información para el mantenimiento y reparación de las vías (ZEYBEK; BIÇICI, 2020).

Según Neto et al., (2019), en Brasil se utilizan tres métodos comunes para levantar datos: el levantamiento visual continuo, la evaluación objetiva de pavimentos y el levantamiento de datos por láser. Cada uno de estos métodos presenta sus propias dificultades y puede que no sean aplicables en todos los entornos. Por lo tanto, es necesario explorar nuevas técnicas que utilicen la tecnología para superar estas limitaciones.

Liang et al. (2020) afirma que la inspección del estado del pavimento se lleva a cabo por ingenieros civiles que utilizan su experiencia y habilidades para determinar el estado actual de la vía y documentar el lugar y el tamaño de cualquier manifestación patológica. Estos informes acerca de la inspección se utilizan para crear planes y presupuestos de mantenimiento y reparación. Sin embargo, la precisión de los datos depende del conocimiento del profesional. Es por ello, que es fundamental complementar la supervisión convencional con otros métodos que apliquen tecnologías para obtener una evaluación más precisa y confiable.

La inspección visual continúa siendo el principal medio de evaluación de la situación de la vía urbana, un procedimiento costoso y demorado, donde los resultados se encuentran alterados por las habilidades del ser humano (MANSOURMOGHADDAM et al., 2022). Con el avance en técnicas de procesamiento de imágenes se ha incentivado la búsqueda de métodos que sean capaces de identificar de manera automática los distintos tipos de deterioros del pavimento (SILVA et al., 2020).

La utilización de dispositivos electrónicos no tripulados como apoyo en el levantamiento visual son un gran avance en la implementación de tecnología en la inspección de pavimentos. Estos dispositivos ofrecen resultados de calidad lo que a su vez mejora los procedimientos de inspección, facilitando la toma de decisión y la detección temprana de fallas en el pavimento.

2.6. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Los Sistemas de Información Geográfica son un sistema de gestión de bases de datos diseñado para capturar, compilar, almacenar, recuperar, visualizar y analizar datos de información territorial, un SIG comprende lo que son datos georreferenciados y de atributos (HADIDI et al., 2016). Con aplicaciones en varios campos de la ingeniería y ciencias, la gestión de pavimentos viene a ser uno de los campos donde se utiliza el SIG (HO; LAI; ALMONNIEAY, 2016).

Lázaro et al., (2022) afirma que la aplicación de geotecnologías se presenta como una herramienta importante para la elaboración de investigaciones sobre el entorno urbano. Los SIG permiten integrar datos viarios para poder evaluar y analizar las vías urbanas de manera más eficiente (MEHDI et al., 2021). Con el avance de las herramientas de sensoramiento remoto, se está utilizando una amplia gama de datos obtenidos por sensores para evaluar y monitorear con mejor precisión la condición de los pavimentos en las vías urbanas (PAN et al., 2021)

Las herramientas del sistema de información geográfica auxilian en el hallazgo de las deformaciones patológicas existentes en las vías urbanas con la ayuda de dispositivos electrónicos no tripulados, se pueden obtener imágenes que son transformadas en mapas de calor mediante programas computacionales. De esta manera es posible identificar la deformación de la vía y aplicar un índice desarrollado con base en la metodología multicriterio.

La aplicación de los SIG conlleva a la obtención de información de calidad y el uso de las herramientas georreferenciadas que se tienen al alcance con la finalidad de aplicar el índice desarrollado a lo largo de esta experiencia. Además los SIG generan mapas y tablas que se pueden emplear para localizar las áreas que requieren mantenimiento (HO; LAI; ALMONNIEAY, 2016). Los registros territoriales georreferenciados se entienden como elementos que poseen de una descripción de ubicación, lo que implica una relación entre la orientación y el espacio que ocupa bidimensional o tridimensionalmente (HADIDI et al., 2016).

La construcción de una propuesta de herramienta metodológica, empleo de tecnología y el uso de sistemas de información geográfica suponen un avance en las metodologías de inspección y revisión de manifestaciones patológicas en la región. Con ello se relaciona la identificación y representación de las manifestaciones patológicas y la medición de los grados de deterioro de estos por medio de mapas de calor.

3 CAPITULO: METODOLOGÍA

En el capítulo 2 se ha revisado la estructura bibliográfica empleada para desarrollar este trabajo de conclusión de curso. Se ha proporcionado una descripción detallada de la metodología multicriterio utilizada en la toma de decisiones sobre los niveles de severidad del estado del pavimento, una síntesis sobre los dispositivos electrónicos no tripulados y su aplicación en el área de la ingeniería civil, y los resultados obtenidos a través de los sistemas de información geográfica mediante el uso imágenes capturas por estos dispositivos conocidos como “drones”.

Por lo tanto, en esta sección se describe la metodología utilizada para lograr los objetivos principales del estudio, incluyendo las etapas para la construcción de un modelo metodológico aplicado que integra el estado del conocimiento junto con experiencias de análisis multicriterio y sistemas de información geográfica.

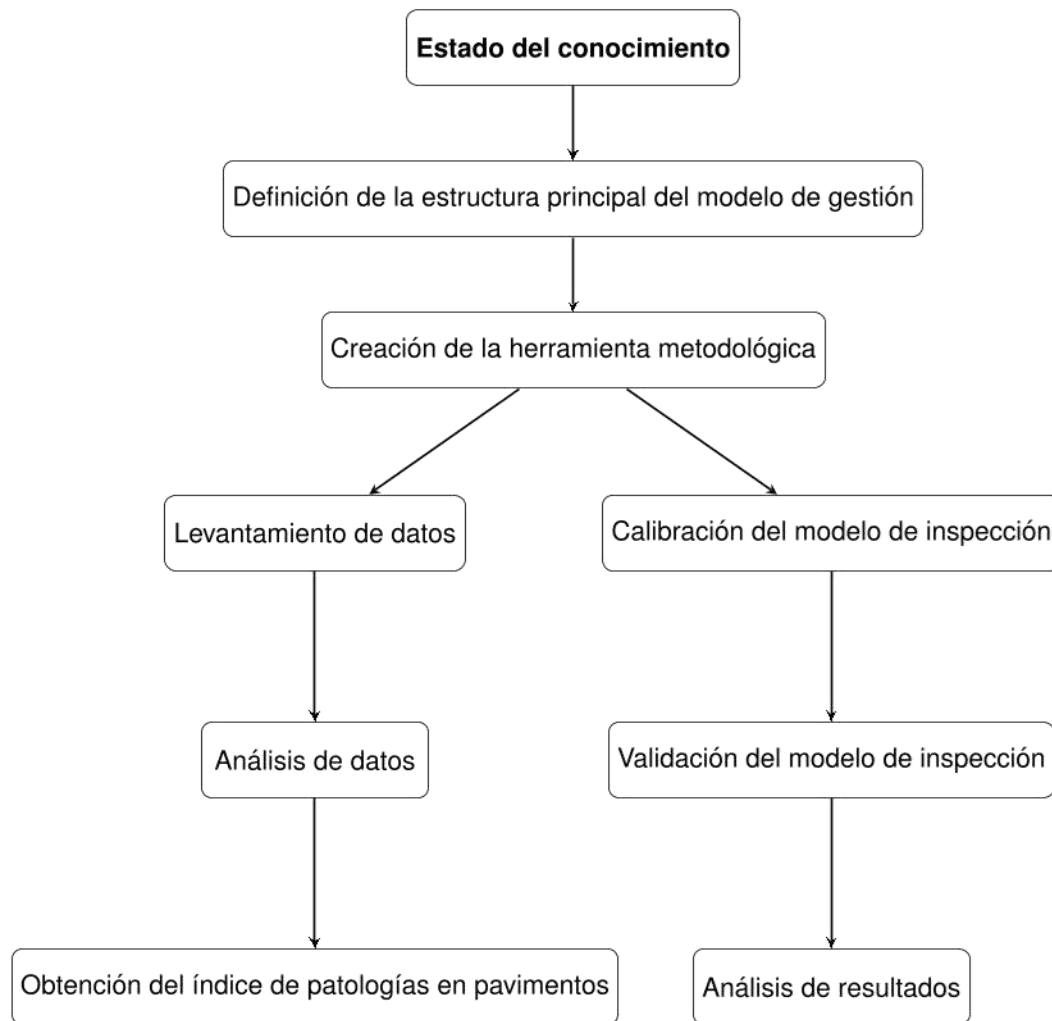
3.1. Caracterización Metodológica

El desarrollo de esta sección implica un nivel de complejidad y un reto mayor en comparación con otros modelos de revisión, identificación y evaluación de indicadores urbanos, ya que incorpora indicadores de distinta índole tanto subjetivas como objetivas, como las deficiencias estructurales en la infraestructura vial y su nivel de calidad.

En este sentido, se ha utilizado la metodología multicriterio para desarrollar indicadores enfocados en el deterioro de la vía urbana. Se han aplicado los pesos resultantes del método AHP, empleando diversos criterios y subcriterios para evaluar el estado de la vía urbana. Cada uno de los criterios se desglosa en subcriterios específicos que permiten obtener una evaluación más detallada y completa de la vía.

Esta metodología no solo permite evaluar el estado actual de las vías urbanas, sino que también puede ser utilizada para establecer directrices de mantenimiento y rehabilitación de las vías a largo plazo, lo que contribuye a mejorar la calidad de vida de los ciudadanos y a reducir costos operacionales.

La **Figura 8** es la representación visual de las diferentes etapas de la metodología utilizada en el estudio. Estas etapas incluyen primeramente la definición de la estructura principal del modelo de gestión, consecuentemente la creación de la herramienta metodológica de donde parte el levantamiento de datos y la calibración del modelo de inspección para finalmente realizar el análisis de los datos del modelo de inspección y así obtener el índice de deterioro patológico (IDP) y el análisis de resultados.

Figura 8. Modelo de gestión de patologías en pavimentos

Fuente: Autora (2023).

Se ha desarrollado una herramienta que mida el nivel de deterioro de un pavimento flexible utilizando dispositivo electrónico no tripulado (Drone Mavic DJI) con un sobrevuelo a alturas de 20 metros. Además, se utilizaron Sistemas de Información Geográfica (SIG) como medio visual para la caracterización de los grados de deterioro, mediante la creación de mapas de calor para cada una de las manifestaciones patológicas.

Se eligieron tramos de vías de 500 metros de longitud para su análisis en este estudio. Esta longitud fue seleccionada para adquirir una cantidad considerable de datos. Totalizando 4 (cuatro) vías para levantamiento fotográfico aéreo y 10 (diez) vías para levantamiento de inspección visual en donde fue aplicada la herramienta metodológica en la ciudad de Foz do Iguaçu.

3.1.1. Estructura Principal del modelo de gestión

Esta sección representa el apartado en el cual se encontrarán la descripción de los defectos de la vía para la identificación y el análisis del estado de la carretera. A partir de la revisión de la literatura existente sobre pavimentos se recopilan y clasifican los diferentes tipos de defectos que afectan la integridad de la vía.

La descripción de las manifestaciones patológicas permitirá realizar un posible diagnóstico acerca del estado de severidad en el que se encuentra el pavimento basándose en las normativas empleadas para este estudio.

3.1.1.1. *Baches y Parches*

Baches

El bache es una imperfección en la superficie del pavimento ocasionada por una falla estructural del pavimento debido a la presencia de agua en la estructura del suelo subyacente y el tráfico que transita sobre el área afectada (AN et al., 2018).

Pueden ser provocados por diversos factores, tales como el derramamiento de combustible, por la circulación de vehículos, siniestros y fuegos, o inclusive por el diseño inadecuado de las carreteras en terrenos que cuentan con características colapsables y dispersivos (NAVEEN; YADAV; KUMAR, 2018).

La DNIT (2005) señala las posibles causas como:

- Sobrecarga de vehículos.
- Deficiencia en el proyecto.
- Deficiencias en la ejecución de construcción.
- Infiltración.

Así como se observa en la **Figura 9**, un bache es una cavidad profunda o superficial que sufre el pavimento en donde se produce la pérdida de material de la superficie, estas cavidades pueden ser de diversos tamaños (AZHAR et al., 2016).

Figura 9. Manifestación patológica “Bache”.



Fuente: Autora (2023).

La unidad de medida es en m^2 (metros cuadrados), el nivel de la severidad está relacionada con la profundidad y abertura de la zona afectada.

La FHWA (2014) afirma que los baches deben contar con un diámetro de como mínimo 150 mm y asigna los siguientes niveles de severidad:

- Bajo: profundidad menor a 50 mm.
- Moderado: profundidad entre 25 a 50 mm.
- Alto: profundidad superior a 50 mm.

Parches

El parche es una técnica utilizada para reparar baches, fisuras, surcos y otros daños en el pavimento. Aunque se considera una acción de mantenimiento del pavimento, es considerada también como un tipo de desgaste, ya que el pavimento no retorna a su estado original (HADJIDEMETRIOU; CHRISTODOULOU; VELA, 2016). Considerado como uno de los defectos del pavimento más fáciles de ser observado (HOANG, 2019).

Las posibles causas según la DNIT (2005) son:

- Alta demanda del tráfico.
- Empleo de materiales de baja calidad.
- Condición ambiental agresiva.
- Problemas de ejecución.

En la **Figura 10** se observa la manifestación patológica, el proceso de parcheo implica la sustitución de la superficie afectada del pavimento, donde se añade un material externo para restaurarla, viene a ser una de las actividades de mantenimiento de mayor costo dependiendo del tamaño y gravedad del daño que se desea reparar

(HADJIDEMETRIOU; CHRISTODOULOU; VELA, 2016).

Figura 10. Manifestación patológica “Parche”.



Fuente: Autora (2023).

La unidad de medida es en m^2 (metros cuadrados), el nivel de la severidad está relacionada con la superficie afectada.

La FHWA (2014) señala que el parche es la porción de suelo removida mayor o igual a 0.1 m^2 y clasifica los siguientes niveles de severidad:

- Bajo: el parche presenta desgaste, surco menor a 6 mm, el bombeo no es evidente y no se percibe pérdida del material.
- Moderado: se presenta ahuellamiento entre 6 a 12 mm y el bombeo aun no es evidente.
- Alto: el deterioro del parche ya es evidente, presenta ahuellamiento superior a 12 mm y el bombeo ya pasa a ser evidente.

3.1.1.2. Deformaciones Superficiales

Ahuellamiento

El ahuellamiento es una depresión de la superficie del pavimento que se produce en dirección de las ruedas de los vehículos, como se muestra en la **Figura 11**, originada por la acumulación de deformaciones permanentes en las capas de la estructura del pavimento (ORELLANA; PROZZI; HONG, 2019).

Según la DNIT (2005) las posibles causas podrían ser por la influencia plástica o por la consolidación diferencial de las capas del pavimento.

Considerada como una falla superficial debido a las repeticiones de carga que soporta una vía. Es ocasionado por las deformaciones permanentes, principalmente por el

deslizamiento lateral de los materiales a causa del tráfico (LEIVA et al., 2017).

Figura 11. Manifestación patológica “Ahuellamiento”



Fuente: INVIAS (2006).

La unidad de medida es en m^2 (metros cuadrados), el nivel de la severidad está relacionada con la profundidad del deterioro, la probable evolución de deterioro de esta patología se daría en piel de cocodrilo y desprendimientos.

INVIAS (2006) asigna los siguientes niveles de severidad:

- Bajo: profundidad menor a 10 mm.
- Moderado: profundidad entre 10 a 25 mm.
- Alto: profundidad superior a 25 mm.

Ondulación

La ondulación es un tipo de irregularidad del pavimento, que crea un padrón ondulado en la superficie asfáltica, generalmente ocurre en el sentido perpendicular al tránsito, se encuentra con frecuencia en las intersecciones donde ocurre el frenado y acelerado de vehículos (TAMRAKAR, 2019).

Una de las probables causas de la manifestación patológica que se observa en la **Figura 12** es el exceso de humedad que se encuentra en las capas del pavimento, la inestabilidad, componentes extraños y retención de agua en la mezcla asfáltica (SOUTO; MORESCO; GOLTZ, 2019).

La DNIT (2005) señala las posibles causas como:

- Inestabilidad de la mezcla asfáltica en la capa revestimiento y/o en la base del pavimento.
- Exceso de humedad en las capas inferiores.
- Contaminación de la carpeta asfáltica por componentes extraños.

- Retención de agua en la mezcla.

Figura 12. Manifestación patológica “Ondulación”



Fuente: INVIAS (2006).

La unidad de medida es en m^2 (metros cuadrados) de área afectada, la probable evolución de deterioro de esta patología son la exudación y el ahuellamiento.

INVIAS (2006) asigna los siguientes niveles de severidad:

- Bajo: profundidad menor a 10 mm.
- Moderado: profundidad entre 10 a 20 mm.
- Alto: profundidad superior a 20 mm.

Exudación

La exudación se da cuando una película se forma en la superficie del pavimento, así como se observa en la **Figura 13**, generando manchas de diversos tamaños, estas manchas pueden afectar la adherencia de las llantas, especialmente en días de lluvia, ya que el asfalto se vuelve menos viscoso y los agregados gruesos quedan más sueltos, disminuyendo de esta forma la macro textura convirtiéndose en un grave problema funcional. Aunque esta patología se trata como superficial también facilita a la hidroplanificación y consecuente deslizamiento de vehículos en la pista de rodaje (PINHEIRO; SILVA; SALOMÃO, 2021).

Según la DNIT (2005) las posibles causas de la exudación son:

- La proporción inadecuada de la mezcla asfáltica genera un exceso de ligante y un bajo índice de vacíos.

- La temperatura del ligante por encima de lo indicado en el momento de la mezcla ocasiona la dilatación de la carpeta asfáltica y la ocupación permanente de los poros entre las partículas.

Figura 13. Manifestación Patológica "Exudación"



Fuente: FHWA (2014)

La unidad de medida es en m^2 (metros cuadrados) de acuerdo con el nivel de severidad.

INVIAS (2006) señala los siguientes niveles de severidad:

- Bajo: la exudación se manifiesta en la superficie en forma de franjas aisladas y delgadas, sin cubrir los agregados gruesos.
- Moderado: Apariencia característica, en donde el asfalto libre forma una delgada película que cubre a los agregados, en el sentido de las llantas de los vehículos, en climas cálidos se torna pegajoso.
- Alto: se nota una cantidad significativa de asfalto en la superficie en donde cubre casi en su totalidad a los agregados, da un aspecto húmedo de un color intenso y negro, en climas cálidos se torna pegajoso.

3.1.1.3. Daños Superficiales

Pulimento del agregado

El pulimento del agregado son zonas en donde se observa una pequeña cantidad de agregado que sobresalen de la superficie de la carpeta asfáltica, o áreas en donde se encuentran partículas de agregado no angulares ni rugosas, una de las posibles causas es el uso de agregados naturalmente lisos y sin triturar (SHAIKH et al., 2022).

Así como se observa en la **Figura 14** el desgaste del aglutinante provoca la exposición de algunos agregados gruesos y finos, lo que se conoce como agregado pulido

(AHMED et al., 2020).

La posible causa según INVIAS (2006) es la baja resistencia o susceptibilidad de ciertos agregados al pulimiento, como ocurre en el caso de las calizas.

Figura 14. Manifestación Patológica "Pulimento del Agregado"



Fuente: FHWA (2014)

La unidad de medida es en m² (metros cuadrados) y según señalan INVIAS (2006) y la FHWA (2014) no posee niveles de severidad.

Pérdida del agregado

La FHWA (2014) lo define como un desgaste superficial debido al desprendimiento de partículas de agregado y a la pérdida del aglutinante asfáltico. Como se observa en la **Figura 15**, va desde pérdidas de finos hasta pérdida de agregados gruesos, tornándose una superficie áspera y agrietada con evidente pérdida de agregado.

El aumento de la rugosidad del pavimento y la pérdida de agregados gruesos puede provocar problemas de seguridad y acortar la duración de vida del pavimento (HSIEH; TSAI, 2021; MASSAHI et al., 2018).

Según INVIAS (2006) algunas de las posibles causas son:

- Distribución irregular del aglutinante.
- Problemas de adherencia entre agregado y asfalto.
- Empleo de agregados contaminados con finos o muy absorbentes.
- Endurecimiento excesivo de la carpeta asfáltica.
- Contaminación de la superficie de rodamiento con aceites, gasolina u otros agentes.

Figura 15. Manifestación Patológica "Pérdida del agregado"



Fuente: Autora (2023).

La unidad de medida es en m^2 (metros cuadrados) de acuerdo con el nivel de severidad.

INVIAS (2006) indica los siguientes niveles de severidad:

- Bajo: separación significativa de agregados gruesos, superior a 0.15 m.
- Moderado: separación mayor entre los agregados, entre 0.05 m a 0.15 m
- Alto: separación extensa de agregados finos y gruesos, superficie rugosa, separaciones inferiores a 0.05 m.

3.1.1.4. Fisuras

Piel de cocodrilo

Las grietas piel de cocodrilo son una serie de grietas interconectadas causadas por cargas repetidas de tráfico en ciertas zonas, especialmente a lo largo de la trayectoria de las ruedas, que conducen a la formación de patrones de deterioro del pavimento en forma de piezas afiladas con ángulos agudos, como se observa en la **Figura 16** se convierte en un patrón de piel de cocodrilo (KARLAFTIS; BADR, 2015; ZHANG et al., 2018).

INVIAS (2006) señala que la piel de cocodrilo suele presentarse en zonas con alto movimiento vehicular, pero que también puede ser hallado en zonas donde consta deformaciones en la superficie del pavimento sin que estén relacionadas a problemas estructurales.

Las posibles causas según la DNIT (2005) son:

- Tráfico activo, en donde se producen ciclos de carga y descarga, promoviendo tensiones de tracción en la fibra inferior del revestimiento.

- Cambio de temperatura que provoca contracciones en el revestimiento.
- Grietas preexistentes en la base de suelo cemento.

Figura 16. Manifestación Patológica “Piel de cocodrilo”



Fuente: Autora (2023).

La unidad de medida es en m² (metros cuadrados), la evolución probable es en baches y descascaramiento. La FHWA (2014) indica los siguientes niveles de severidad:

- Bajo: Poca o ninguna conexión entre las grietas, no presentan desgaste ni sellado, no se observa hundimiento en la superficie.
- Moderado: Grietas interconectadas formando un patrón completo, pueden ser selladas, no se observa hundimiento en la superficie.
- Alto: Grietas interconectadas con desgaste moderado a severo generando un patrón completo, se observa hundimiento en la superficie.

Fisura de bloque

Las fisuras en bloque son grietas que se superponen y dividen el pavimento en piezas rectangulares o cuadradas, cuyo tamaño varía entre 0.1 m² a 9 m² (ver **Figura 17**). Los bloques más grandes pueden ser clasificados como fisuras transversales o longitudinales (ALAAMRI; KATTIPARUTHI; KOYA, 2017).

Las posibles causas según la DNIT (2005) son:

- El flujo constante de carga y descarga generan fuerzas de tracción interna del revestimiento.
- Variaciones de temperatura diaria causan contracciones en el revestimiento.

Figura 17. Manifestación Patológica "Fisuras en bloque"



Fuente: Autora (2023).

La unidad de medida es en m^2 (metros cuadrados), la evolución probable es en baches y descascaramiento. La FHWA (2014) indica los siguientes niveles de severidad:

- Bajo: Fisura cuyo ancho no supera 6 mm, o fisuras selladas que se encuentran en buenas condiciones.
- Moderado: fisura con un ancho entre 6mm a 19 mm que está rodeada de fisuras aleatorias de baja severidad. Las fisuras aleatorias se consideran adyacentes cuando se encuentren a una distancia de hasta 0.3m de la falla principal.
- Alto: fisura con un ancho superior a 19 mm. Las fisuras aleatorias se consideran adyacentes cuando se encuentren a una distancia de hasta 0.3m de la falla principal.

Fisura de borde

Las fisuras de borde comienzan con forma de medialuna y se extienden hasta adoptar la apariencia similar a la de piel de cocodrilos. Este tipo de grietas se manifiestan en el borde del pavimento debido a la debilidad de la vía en esa zona causada por diversos factores (WADA, 2016).

INVIAS (2006) señala que una de las causas principales es la falta de soporte lateral en la estructura debido a la ausencia de los bordillos, anchuras de berma inadecuadas o sobre carpetas que no llegan al borde de la sección y quedan a diferentes alturas con respecto a la berma. Como se observa en la **Figura 18**, las fisuras se originan donde los vehículos circulan muy próximos del borde de la calzada.

Figura 18. Manifestación Patológica "Fisura de borde"



Fuente: FHWA (2014)

La unidad de medida es en metros, la evolución probable es desprendimiento del borde y descascaramiento. La FHWA (2014) indica los siguientes niveles de severidad:

- Bajo: Fisuras que no presentan ruptura ni pérdida de material.
- Moderado: Fisuras que presentan ruptura y pérdida de material, puede alcanzar hasta el 10% de la longitud de la superficie afectada.
- Alto: Fisuras con ruptura considerable y pérdida del material que supera el 10% de la longitud de la superficie afectada.

Fisura longitudinal

INVIAS (2006) define la fisuración longitudinal como discontinuidades de la carpeta asfáltica, en la misma dirección del tránsito, son indicio de la existencia de esfuerzo de tensión en alguna de las capas de la estructura, los cuales han superado la resistencia del material afectado.

Como se observa en la **Figura 19** las fisuras longitudinales se encuentran mayormente en dirección paralela al eje central FHWA (2014). La localización de las fisuras dentro del carril pueden ser buen indicativo de la causa que las genere, ya que aquellas que se encuentran en zonas sujetas a carga pueden estar relacionadas con problemas de fatiga de toda la estructura o de alguna de sus partes INVIAS (2006).

Las causas más comunes según la INVIAS (2006) son:

- El aumento de la rigidez de la mezcla asfáltica debido al envejecimiento de la carpeta asfáltica o a un exceso de agregado mineral, puede provocarse por bajas temperaturas o grandes variaciones térmicas.

- La reflexión de capas inferiores producidas en materiales estabilizados o por la presencia de grietas o juntas en las placas de concreto hidráulico subyacentes.
- Se manifiesta en las áreas sometidas a tráfico frecuente.

Figura 19. Manifestación Patológica " Fisura longitudinal"



Fuente: Autora (2023).

La unidad de medida es en metros, la evolución probable es piel de cocodrilo, descascaramiento, desintegración. La FHWA (2014) indica los siguientes niveles de severidad:

- Bajo: Fisura cuyo ancho no supera 6 mm, o fisuras selladas que se encuentran en buenas condiciones.
- Moderado: fisura con un ancho entre 6mm a 19 mm que está rodeada de fisuras aleatorias de baja severidad. Las fisuras aleatorias se consideran adyacentes cuando se encuentren a una distancia de hasta 0.3m de la falla principal.
- Alto: fisura con un ancho superior a 19 mm. Las fisuras aleatorias se consideran adyacentes cuando se encuentren a una distancia de hasta 0.3m de la falla principal.

Fisura por reflexión de juntas

La FHWA (2014) menciona que la fisuración en reflexión de juntas son las fisuras de la capa de concreto asfáltico que se presentan sobre las juntas en los pavimentos de concreto. Las fisuras se hacen evidentes en la superficie como resultado de las juntas entre las placas y pueden presentar un patrón regular. También puede ocurrir cuando hay grietas en las placas de concreto rígido que se reflejan en la superficie generando un patrón

irregular como se observa en la **Figura 20** (INVIAS, 2006).

Estas fisuras son a causa de la expansión y contracción de las juntas entre las placas de concreto rígido o de los bloques conformados por las grietas consecuencia de los cambios de temperatura y humedad, generalmente no se deben al tráfico vehicular aunque esto provoca que empeore el nivel de severidad por causa de las cargas del tránsito (INVIAS, 2006).

Figura 20. Manifestación Patológica "Fisuración por reflexión de juntas"



Fuente: FHWA (2014)

La unidad de medida es en metros, la evolución probable es fisura en bloques, descascaramiento, baches. La FHWA (2014) indica los siguientes niveles de severidad:

- Bajo: fisura con un ancho promedio menor que 6 mm, o una fisura sellada con material en buenas condiciones.
- Moderado: fisura con ancho entre 6 mm a 19 mm.
- Alto: fisura con un ancho superior a 19 mm.

Fisura transversal

INVIAS (2006) define la fisuración transversal como discontinuidades de la carpeta asfáltica, en dirección perpendicular al tránsito, son indicio de la existencia de esfuerzo de tensión en alguna de las capas de la estructura, los cuales han superado la resistencia del material afectado.

Como se ve en la **Figura 21** las fisuras transversales se encuentran perpendicular al eje central FHWA (2014). La localización de las fisuras dentro del carril pueden ser buen indicativo de la causa que las generó, ya que aquellas que se encuentran en zonas sujetas a carga pueden estar relacionadas con problemas de fatiga de toda la estructura o de

alguna de sus partes (INVIAS, 2006).

Las causas más comunes según la INVIAS (2006) son:

- El aumento de la rigidez de la mezcla asfáltica debido al envejecimiento de la carpeta asfáltica o a un exceso de agregado mineral, puede provocarse por bajas temperaturas o grandes variaciones térmicas.
- La reflexión de capas inferiores producidas en materiales estabilizados o por la presencia de grietas o juntas en las placas de concreto hidráulico subyacentes.
- Ausencia total o insuficiente riego de liga.
- Capa de rodadura con espesor insuficiente.

Figura 21. Manifestación Patológica " Fisura transversal"



Fuente: Autora (2023).

La unidad de medida es en metros, la evolución probable es piel de cocodrilo, descascaramiento, desintegración. La FHWA (2014) indica los siguientes niveles de severidad:

- Bajo: Fisura cuyo ancho no supera 6 mm, o fisuras selladas que se encuentran en buenas condiciones.
- Moderado: fisura con un ancho entre 6mm a 19 mm que está rodeada de fisuras aleatorias de baja severidad. Las fisuras aleatorias se consideran adyacentes cuando se encuentren a una distancia de hasta 0.3m de la falla principal.
- Alto: fisura con un ancho superior a 19 mm. Las fisuras aleatorias se consideran adyacentes cuando se encuentren a una distancia de hasta 0.3m de la falla principal.

3.1.1.5. Otros daños

Afloramiento de finos

FHWA (2014) define que el afloramiento de finos se refiere a la presencia de agua que es filtrada o expulsada por debajo del pavimento a través de fisuras, puede ser detectado a partir de la presencia de materiales finos que han sido bombeados hacia la superficie y van dejando manchas (ver **Figura 22**).

INVIAS (2006) menciona que una de las posibles causas es la falta o ineficiente sistema de subdrenaje, así como el exceso de materiales finos en la estructura.

Figura 22. Manifestación Patológica "Afloramiento de finos"



Fuente: FHWA (2014)

La posible evolución es piel de cocodrilo, baches y descascaramiento. Este tipo de daño no se clasifica por grados de deterioro y no posee una unidad de medida. Solo se reporta la presencia de afloramiento de finos cuando se identifica este daño en la vía.

Separación de la berma

INVIAS (2006) menciona que este daño se caracteriza por un aumento entre la separación de la junta que existe entre la calzada y la berma, lo que conlleva a que exista la filtración de agua hacia el interior de la estructura del pavimento. Este tipo de daño se relaciona con el movimiento de la berma, como consecuencia de la inestabilidad de taludes aledaños y la falta de conexión entre calzada y berma (ver **Figura 23**).

Figura 23. Manifestación Patológica "Separación de la berma"



Fuente: Autora (2023).

La unidad de medida es en metros, la evolución probable son fisuras de borde y hundimientos.

INVIAS (2006) indica los siguientes niveles de severidad:

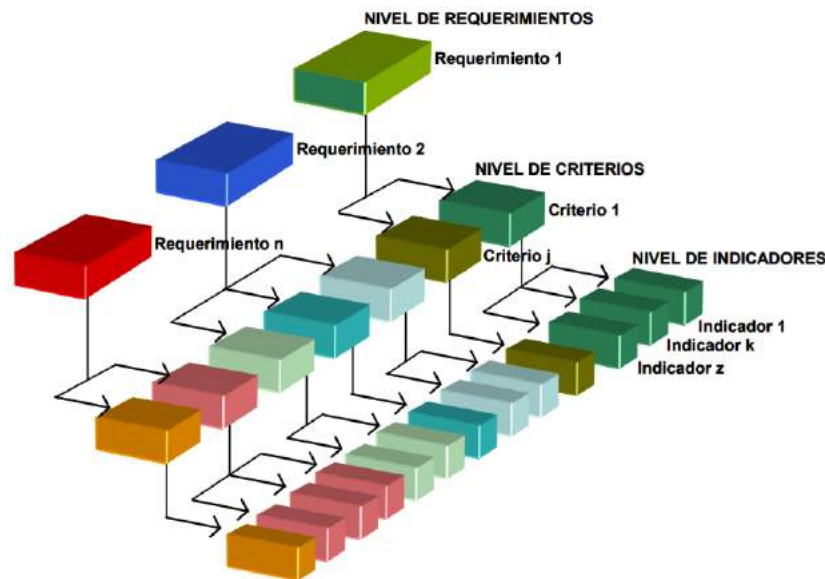
- Bajo: la abertura es menor a 3 mm.
- Moderado: la abertura esta entre 3 mm y 10 mm.
- Alto: la abertura es mayor a 10 mm.

3.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO MULTICRITERIO

En esta sección se describe la construcción del modelo multicriterio, desde su concepción hasta su implementación y evaluación posterior. Se detallan los procesos de selección y ponderación de criterios e indicadores para la construcción del modelo, así como también se describen las herramientas utilizadas.

3.2.1. Árbol de Requerimientos

Los árboles de decisión tienen la ventaja de identificar las variables más relevantes de un determinado problema. Al ser construido, aquellas características que no son relevantes para la toma de decisiones pueden ser descartadas, lo que disminuye la selección de características, facilitando la aplicación (COTAZO et al., 2020).

Figura 24. Presentación del despliegue de requerimientos en criterios e indicadores

Fuente: VILLEGAS (2009)

Como se observa en la **Figura 24** es fundamental identificar las condiciones que afectan a un determinado problema a partir de los requerimientos, criterios e indicadores para encontrar una solución adecuada. La definición de estos componentes permite tener un enfoque claro sobre lo que se necesita para abordar dicho problema, de manera efectiva y eficiente, lo que conduce a la búsqueda de soluciones viables.

La caracterización de las condiciones del problema constituye el primer paso para el desarrollo de una solución efectiva, teniendo en cuenta tanto las necesidades de la vía como la de los usuarios.

La estructura del árbol de requerimientos en la **Tabla 4** está diseñada de forma que el problema se integre en las necesidades y por lo tanto se pueda evaluar rigurosamente a través de criterios e indicadores.

Tabla 4. Árbol de Requerimientos

Requerimientos	Criterios	Indicadores
Confort	Fisuras	1. Piel de cocodrilo
		2. Fisura de bloque
	Daños Superficiales	3. Pulimento del agregado
		4. Fisura de borde
Funcional	Fisuras	5. Fisura longitudinal
		6. Fisura por reflexión de juntas
		7. Fisura transversal

Estructural	Baches y Parches	8. Parches
	Deformaciones Superficiales	9. Ahuellamiento
		10. Ondulación
		11. Exudación
	Otros daños	12. Afloramiento de finos
	Baches y Parches	13. Baches
	Daños Superficiales	14. Pérdida del agregado
	Otros daños	15. Separación de la Berma

Fuente: Autora (2023).

Dentro de la estructura del árbol de requerimientos se encuentran los requerimientos confort, funcional y estructural, estos 3 requerimientos son fundamentales para garantizar la calidad y seguridad de la vía, ya que abordan aspectos relacionados con la seguridad del usuario y la condición de servicio de la carretera.

El requerimiento confort tiene como objetivo garantizar la máxima comodidad posible del usuario en su desplazamiento por la vía teniendo en cuenta todos los factores que puedan afectar a su bienestar, se consideran incluso los indicadores más insignificantes que puedan alterar dicha comodidad, como lo son las fisuras y los daños superficiales.

El requerimiento funcional busca garantizar el desempeño funcional de la estructura del pavimento asegurando que cumpla con los requisitos necesarios para su uso. En este sentido, busca asegurar que el pavimento cumpla con dichos requisitos, para ello es necesario tener en cuenta los diversos factores que influyen en su funcionalidad, como las fisuras, baches, parches, deformaciones superficiales, entre otros daños.

El requerimiento estructural se relaciona directamente con la durabilidad de la vía y seguridad de los usuarios, como con los costos operacionales de mantenimiento de vehículos y las inversiones en el reparo de las vías. Para garantizar la durabilidad de la estructura del pavimento los criterios que más afectan son daños superficiales, baches y parches, entre otros daños que comprometan a la estructura del pavimento.

Se seleccionaron criterios específicos que cumplieran con los requerimientos establecidos y que abarcaran las deformaciones más frecuentes que se presentan en el pavimento asfáltico. En este sentido, se consideraron los diferentes tipos de deterioros para una correcta evaluación de la condición de la superficie de rodadura.

La **Tabla 5** muestra la selección de las manifestaciones patológicas del pavimento para este estudio, las cuales se presentan con frecuencia y afectan al pavimento comprometiendo la seguridad de los usuarios en la carretera.

Las manifestaciones patológicas del pavimento se organizaron a partir de la revisión de la literatura, fueron clasificados criterios e indicadores a partir de los requerimientos y del objetivo principal de este trabajo.

Tabla 5. Indicadores considerados en el estudio.

Indicadores	Área de aplicación	Referencias
Fisuración por reflexión de juntas	Detección de fallas en pavimentos.	KAPELA et al. (2015)
Piel de cocodrilo	Comportamiento de fatiga de mezclas asfálticas.	HADDADI et al. (2015)
Fisuración de borde	Gestión y mantenimiento de carreteras.	WADA (2016)
Afloramiento de finos	Detección automatizada de fallas en el pavimento.	COENEN; GOLROO (2017)
Ahuellamiento	Mantenimientos de pavimentos.	LEIVA et al. (2017)
Pulimento del agregado	Evaluación funcional de pavimentos urbanos.	ALBUQUERQUE (2017)
Fisuración longitudinal	Diseño de pavimentos flexibles.	GONG et al. (2017)
Pérdida del agregado	Implementación de herramientas para evaluación del desempeño de mezclas.	MASSAHI et al. (2018)
Ondulación	Construcción y mantenimiento de pavimentos.	TAMRAKAR (2019)
Fisuración en bloques	Desarrollo de modelos matemáticos bidimensionales para el análisis de daños en el pavimento.	WANG et al. (2020)
Separación de la Berma	Evaluación y mantenimiento del pavimento.	CHAWLA (2021)
Fisuración transversal	Construcción y mantenimiento del pavimento asfáltico.	GHOS et al. (2022)
Parches	Evaluación de pavimentos flexibles y planificación de servicios de restauración.	GOMES et al. (2022)
Exudación	Desarrollo de un sistema automático de inspección de pavimentos.	RANJBAR; NEJAD; ZAKERI (2022)
Baches	Evaluación del deterioro del pavimento.	GHADI; AHMAD; JANNOUD, (2023)

Fuente: Autora (2023).

Estos indicadores harán posible la identificación y toma de medida del grado de deterioro del pavimento, así como la evaluación de la necesidad de intervención de la vía,

auxiliando en la toma de decisión de los responsables.

3.2.2. Asignación de pesos por AHP

Según Milad et al., (2018) las personas no consiguen lidiar con varias informaciones a la vez sobre un determinado problema, por lo que el método de comparación del AHP utiliza pares de comparación para descubrir las preferencias de los tomadores de decisión con relación al deterioro del pavimento. Esto hace que la herramienta AHP sea útil para determinar la prioridad de mantenimiento del pavimento.

Para la ponderar valores siguiendo la metodología AHP, se utilizan matrices de comparación en donde los indicadores son comparados para conocer el nivel de importancia que posee uno sobre el otro. Los expertos utilizan su conocimiento sobre manifestaciones patológicas y asignan pesos que varían del 1 al 9 como se muestra en la **Tabla 2**.

Para asegurarse de que los pesos asignados son coherentes, se calcula la razón de coherencia (CR), que consiste en la relación entre el índice de consistencia (IC) y el índice de consistencia aleatoria (RI), para matrices 2x2 no es necesario realizar la razón de coherencia.

Conforme se ha mencionado en la sección 2.4.1. **Analytic Hierarchy Process (AHP)**, el cálculo del índice de consistencia (IC) se realiza utilizando planillas de cálculo para obtener el valor de $n_{máx}$, normalizando una matriz y multiplicándola por el vector de pesos, luego se suman los valores obtenidos para calcular el índice de consistencia (IC) a partir de la aplicación de la Ecuación 1.

Se aplica continuamente la Ecuación 2 para obtener el índice de consistencia aleatoria (RI). Y finalmente se puede realizar la Razón de Coherencia (CR) aplicando la Ecuación 3.

Dado que algunos de los indicadores son unitarios, no se requiere la matriz de comparación, por lo que se les asigna directamente un valor del 100%.

La **Tabla 6** muestra los valores de los pesos (indicados entre paréntesis) obtenidos a través del método de análisis jerárquico (AHP) para los requerimientos propuestos en este estudio. Se destaca que el requerimiento “Estructural” posee más de la mitad de la importancia en comparación con los otros dos requerimientos, confort y funcional, con un peso de 55%, mientras que estos dos últimos poseen un peso de 15% y 30% respectivamente.

Tabla 6. Pesos de cada atributo evaluado para el estudio.

Requerimientos	Criterios	Indicadores
Confort (15%)	Fisuras (65%)	Piel de cocodrilo (35%)
		Fisura de bloque (65%)
	Daños superficiales (35%)	Pulimiento del agregado (100%)
Funcional (30%)	Fisuras (25%)	Fisura de borde (20%)
		Fisura longitudinal (30%)
		Fisura por reflexión de juntas (25%)
		Fisura transversal (25%)
	Baches y Parches (30%)	Parches (100%)
	Deformaciones Superficiales (20%)	Ahuellamiento (35%)
		Ondulación (40%)
Estructural (55%)	Otros daños (25%)	Exudación (25%)
	Baches y Parches (45%)	Afloramiento de finos (100%)
	Otros daños (35%)	Baches (100%)
	Daños superficiales (20%)	Pérdida del agregado (100%)
		Separación de la Berma (100%)

Fuente: Autora (2023).

Luego de la asignación de pesos corresponde el análisis del estado del pavimento y la medida del grado de severidad usando los pesos establecidos. Esta evaluación permitirá identificar las zonas en el pavimento que necesitan mayor mantenimiento, garantizando la seguridad y calidad del pavimento.

3.2.3. Análisis y definición del grado de deterioro

En esta sección se encuentra la asignación de pesos de cada uno de los indicadores que componen los requerimientos establecidos para este estudio. Cada indicador cuenta con parámetros que miden el estado de deterioro de un pavimento asfáltico, desde el estado inicial de deformación de la vía hasta el máximo nivel de deterioro. Estas variables componen la inspección visual en donde se determina cada fase del progreso de la manifestación patológica.

Teniendo en cuenta los parámetros y las irregularidades que pueden surgir durante la inspección visual del pavimento, se asignan una serie de valores que dependen de la intensidad de la irregularidad.

En la **Tabla 7** se encuentran los parámetros que evalúan a la manifestación patológica “Piel de cocodrilo” asociada al criterio “Fisuras” que forma parte del requerimiento “Confort”.

Tabla 7. Parámetros del indicador "Piel de Cocodrilo"

PIEL DE COCODRILO		
Variables	Inspección Visual	Valoración
Fisuras	Principio de fisuras sin unión	5
	Aparición de fisuras unidas	10
	Fisuras selladas y baja profundidad	15
	Fisuras abiertas y profundas	20
	Evaluación de fisuras formando estructuras de grietas	25
Bombeo de finos	Señales evidentes de bombeo	10
Estructura	Indicio de depresiones en el pavimento	15

NIVEL DE DETERIORO		
Bajo	Medio	Alto
0 - 30	30 - 85	> 85

Fuente: Autora (2023).

La **Tabla 7** muestra que las variables que forman parte del indicador “Piel de cocodrilo” están relacionadas con la formación de fisuras, bombeo de finos y la estructura del pavimento como los indicios de depresiones en el mismo. Consecuentemente se encuentra la asignación del nivel de deterioro, que es el resultado de la suma de los pesos según lo encontrado en la inspección visual.

Por su parte en la **Tabla 8** se asignan valores dependiendo de la amplitud de los patrones del indicador “fisura de bloque”, notándose que cuanto mayor sea la amplitud y profundidad de la manifestación patológica, aumenta la valoración y, en consecuencia, recibe un nivel de deterioro mayor.

Tabla 8. Parámetros del indicador "Fisura de Bloque"

FISURA DE BLOQUES		
amplitud de patrones (m)	Abertura de las patologías	Valoración
0,10 a 0,30	≤ 6 mm o fisuras cerradas.	5
	> 6 mm y ≤ 19 mm	10
	> 19 mm	15
0,30 a 0,60	≤ 6 mm o fisuras cerradas.	20
	> 6 mm y ≤ 19 mm	25
	> 19 mm	30
mayor que 0,6	≤ 6 mm o fisuras cerradas.	40
	> 6 mm y ≤ 19 mm	50
	> 19 mm	60

NIVEL DE DETERIORO		
Bajo	Medio	Alto
0 - 15	15 - 30	> 30

Fuente: Autora (2023).

La **Tabla 9** muestra los parámetros asociados al indicador "Pulimento del agregado", el cual está vinculado al criterio "daños superficiales" del requerimiento "confort". El parámetro que evalúa este indicador se basa en la rugosidad de los agregados, y aunque esta manifestación patológica no está clasificada en niveles de severidad según las normativas utilizadas en este estudio, se han asignado pesos específicos a los parámetros para su evaluación.

Tabla 9. Parámetros del indicador "Pulimento del agregado"

PULIMENTO DEL AGREGADO		
Parámetro	Inspección visual	Valoración
Agregados	Suave al tacto, agregados insignificantes	10
	Moderado, agregados pequeños	15
	Moderado, agregados grandes	25
	Rugoso, agregados angulares	35

NIVEL DE DETERIORO		
Bajo	Medio	Alto
0 - 15	15 - 25	> 25

Fuente: Autora (2023).

La **Tabla 10** presenta la distribución de pesos correspondientes al indicador "Fisura de borde" que forma parte del criterio "Fisuras" y se incluye en el requerimiento "Funcional". Es necesario señalar que este requerimiento es distinto al que se mencionó anteriormente.

Tabla 10. Parámetros del indicador "Fisura de borde"

FISURA DE BORDE		
Parámetro	Inspección visual	Valoración
Fisuras	Fisuras incipientes	5
	Fisuras propagadas	15
Erosión del pavimento	De 0 a 10%	20
	entre 10 a 50%	30
	superior al 50%	50

NIVEL DE DETERIORO		
Bajo	Medio	Alto
0 - 5	5 - 35	> 35

Fuente: Autora (2023).

Los parámetros de la **Tabla 10** evalúan los tipos de fisuras que afectan a la severidad de la fisura de borde, así como la evolución de la erosión del pavimento. El análisis de estos parámetros puede conducir a una mejor comprensión de la condición del pavimento identificando el nivel de deterioro asociado a la vía.

En la

Tabla 11 se establecen los criterios de puntuación para el indicador "fisura longitudinal", teniendo en cuenta la abertura de las patologías en función de la amplitud de los patrones, estos patrones se definen en términos de longitud en metros y la amplitud en metros cuadrados ya que se consideran las fisuras que se encuentran en el área adyacente a la falla principal dentro de una distancia de 0.3 m de esta.

Tabla 11. Parámetros del indicador "Fisura longitudinal"

FISURA LONGITUDINAL		
amplitud de patrones (m ²)	Abertura de las patologías	Valoración
0,10 a 0,30	≤ 6 mm o fisuras cerradas.	5

	> 6 mm y ≤ 19 mm	10
	> 19 mm	15
	≤ 6 mm o fisuras cerradas.	20
0,30 a 1,5	> 6 mm y ≤ 19 mm	25
	> 19 mm	30
	≤ 6 mm o fisuras cerradas.	40
> 1,5	> 6 mm y ≤ 19 mm	50
	> 19 mm	60
	≤ 6 mm o fisuras cerradas.	40

NIVEL DE DETERIORO		
Bajo	Medio	Alto
0 - 15	15 - 30	> 30

Fuente: Autora (2023).

En la **Tabla 12** se mencionan los parámetros para el indicador “fisura por reflexión de juntas”, se consideran los mismos parámetros que aplican a las fisuras longitudinales mencionados en la **Tabla 11**, las fisuras por reflexión de juntas se tratan de fisuras que aparecen en la capa de concreto asfáltico.

Tabla 12. Parámetros del indicador "Fisura por reflexión de juntas"

FISURA POR REFLEXIÓN DE JUNTAS		
amplitud de patrones (m ²)	Abertura de las patologías	Valoración
0,10 a 0,30	≤ 6 mm o fisuras cerradas.	5
	> 6 mm y ≤ 19 mm	10
	> 19 mm	15
0,30 a 1,5	≤ 6 mm o fisuras cerradas.	20
	> 6 mm y ≤ 19 mm	25
	> 19 mm	30
> 1,5	≤ 6 mm o fisuras cerradas.	40
	> 6 mm y ≤ 19 mm	50
	> 19 mm	60

NIVEL DE DETERIORO		
Bajo	Medio	Alto
0 - 15	15 - 30	> 30

Fuente: Autora (2023).

Las fisuras transversales se evalúan con los mismos parámetros que las fisuras longitudinales, ya que comparten características similares en términos de apertura y patrón de fisuración, la única diferencia es el sentido que tiene la fisura, ya que las fisuras transversales se extienden perpendicularmente a la dirección del tránsito. En la **Tabla 13** se encuentran los parámetros para evaluar el indicador “fisura transversal”.

Tabla 13. Parámetros del indicador "Fisura transversal"

FISURA TRANSVERSAL		
amplitud de patrones (m²)	Abertura de las patologías	Valoración
0,10 a 0,30	≤ 6 mm o fisuras cerradas.	5
	> 6 mm y ≤ 19 mm	10
	> 19 mm	15
0,30 a 1,5	≤ 6 mm o fisuras cerradas.	20
	> 6 mm y ≤ 19 mm	25
	> 19 mm	30
> 1,5	≤ 6 mm o fisuras cerradas.	40
	> 6 mm y ≤ 19 mm	50
	> 19 mm	60

NIVEL DE DETERIORO		
Bajo	Medio	Alto
0 - 15	15 - 30	> 30

Fuente: Autora (2023).

La **Tabla 14** presenta la asignación de pesos para el indicador "Parches" el cual pertenece al criterio "Baches y parches" y se incluye dentro del requerimiento “Funcional”. La evaluación se realiza teniendo en cuenta la amplitud de los patrones y el hundimiento que presenten. A medida que el área afectada aumenta, el nivel del daño se agrava y se asigna una puntuación acorde al tamaño de la zona afectada.

Tabla 14. Parámetros del indicador "Parches"

PARCHES

amplitud de patrones (m ²)	Hundimiento de las patologías	Valoración
0,1	surco < 6 mm. No se evidencia bombeo y no existe pérdida del material	15
	ahuellamiento entre > 6 mm y ≤ 12 mm. No se evidencia bombeo.	25
	ahuellamiento > 12 mm. Evidencia de bombeo.	35
> 0,1	surco < 6 mm. No se evidencia bombeo y no existe pérdida del material	45
	ahuellamiento entre > 6 mm y ≤ 12 mm. No se evidencia bombeo.	55
	ahuellamiento > 12 mm. Evidencia de bombeo.	75

NIVEL DE DETERIORO		
Bajo	Medio	Alto
0 - 25	25 - 35	> 35

Fuente: Autora (2023).

La **Tabla 15** muestra la asignación de pesos para el indicador "Ahuellamiento", el cual está relacionado con el criterio "Deformaciones superficiales" y forma parte del requerimiento "Funcional". El parámetro que evalúa este indicador es la profundidad de la deformación plástica, y conforme esta profundidad aumenta, se asigna un valor superior de deterioro.

Tabla 15. Parámetros del indicador "Ahuellamiento"

AHUELLAMIENTO		
Parámetro	Profundidad de las patologías	Valoración
Deformación plástica	Inferior a 10 mm	25
	> 10 mm y ≤ 25 mm	50
	Superior a 25 mm	75

NIVEL DE DETERIORO		
Bajo	Medio	Alto
0 - 25	25 - 50	> 50

Fuente: Autora (2023).

En la **Tabla 16** se muestra la distribución de pesos para el indicador “Ondulación”, la inspección visual que se realiza busca combinar dos variables, la profundidad de la deformación y el nivel de comodidad al conducir. Estas variables son evaluadas y se les asignan valores que dependen de la gravedad de la manifestación patológica, lo cual permitirá ajustarse a los niveles previamente determinados.

Tabla 16. Parámetros del indicador "Ondulación"

ONDULACIÓN		
Profundidad (mm)	Inspección Visual	Valoración
< 10 mm	Proporciona una conducción suave y cómoda	5
	Proporciona una conducción vibrante e incómoda	15
> 10 mm y ≤ 20 mm	Proporciona una conducción vibrante e incómoda	35
	Proporciona una conducción excesivamente vibrante y altamente incómoda.	50
> 20 mm	Proporciona una conducción excesivamente vibrante y altamente incómoda.	75

NIVEL DE DETERIORO		
Bajo	Medio	Alto
0 -15	15 - 35	>35

Fuente: Autora (2023).

La **Tabla 17** detalla los parámetros utilizados en la inspección visual del indicador “exudación”, se considera el grado de formación de la película o el exudado del ligante asfáltico en la superficie del pavimento. Los pesos están definidos en función del grado de formación, desde el nivel mínimo de aparición hasta el nivel que puede generar una superficie de rodadura deslizante y pegajosa.

Tabla 17. Parámetros del indicador "Exudación"

EXUDACIÓN		
amplitud de patrones (m²)	Inspección Visual	Valoración
0 a 5	Exudación visible en delgadas y finas líneas, sin cubrir los agregados	25
5 a 10	Exceso de asfalto sin ligar parcialmente, cubriendo los agregados	50
> 10	Abundante cantidad de asfalto pegajoso que cubre totalmente los agregados.	75

NIVEL DE DETERIORO		
Bajo	Medio	Alto
0 -25	25 - 50	>50

Fuente: Autora (2023).

La **Tabla 18** incluye el indicador "Afloramiento de finos", que está relacionado con el criterio "Otros daños" del requerimiento "Funcional". La evaluación de este indicador se basa en un parámetro que considera las posibles causas y la evolución probable de la manifestación patológica. Es importante mencionar que esta manifestación patológica no está clasificada en niveles de severidad según las normas utilizadas en este estudio, y normalmente solo se reporta su presencia cuando se identifica en la vía. Sin embargo, se han asignado pesos específicos a los parámetros para su correspondiente evaluación.

Tabla 18. Parámetros del indicador "Afloramiento de finos"

AFLORAMIENTO DE FINOS		
Parámetro	Inspección visual	Valoración
Agregados	Material fino en la superficie	25
	Piel de cocodrilo	50
	Descascareamientos	75

NIVEL DE DETERIORO		
Bajo	Medio	Alto
0 -25	25 - 50	>50

Fuente: Autora (2023).

Los pesos asignados al indicador "Baches" (ver **Tabla 19**), está asociada con el criterio "Baches y parches" y pertenece al requerimiento "Estructural". Los parámetros asignados para la inspección visual tienen en cuenta tanto la dimensión lineal como la profundidad de los patrones en la manifestación patológica. El desprendimiento superficial y la exposición de las capas delgadas se consideran como un deterioro incipiente en la superficie del pavimento.

La exposición de la base representa un daño de mayor gravedad, ya que se ha eliminado parte del pavimento y se ha quedado expuesta la base directamente. Finalmente, la exposición de la base granular indica que el daño ha llegado a una profundidad mayor, llegando hasta la capa granular del pavimento.

Tabla 19. Parámetros del indicador "Baches"

BACHES		
Profundidad de patrones (mm)	Inspección Visual	Valoración
< 25 mm	Dimensión lineal de 150 mm	5
	Desprendimiento superficial, capas delgadas	15
> 25 mm y ≤ 50 mm	Exposición de la base	35
	Exposición de la base granular	50
> 50 mm	Exposición de la base granular	75

NIVEL DE DETERIORO		
Bajo	Medio	Alto
0 -15	15 - 35	>35

Fuente: Autora (2023).

El parámetro utilizado en la inspección visual del indicador "Pérdida del agregado" (ver **Tabla 20**) se basa en la separación de los agregados en la estructura de la superficie de rodadura. Este indicador pertenece al criterio "Daños superficiales" del requerimiento "Estructural".

La valoración mínima se asigna solo cuando se detecta una separación entre los agregados gruesos, una valoración intermedia cuando se denota una separación entre los agregados finos y gruesos. Y finalmente, se otorga una valoración mayor cuando la

superficie presenta una aspereza significativa y es posible observar que se encuentra con agregados sueltos visibles.

Tabla 20. Parámetros del indicador "Pérdida del agregado"

PÉRDIDA DEL AGREGADO		
Parámetro	Inspección visual	Valoración
Agregados	Los agregados gruesos han comenzado a separarse y hay pequeños huecos con una separación mayor a 0,15 m	25
	Existe una mayor separación de agregados con distancias entre 0,05m y 0,15 m	50
	Existe una separación extensiva de agregados finos y gruesos con separaciones menores a 0,05m, lo que hace que la superficie sea muy áspera y se ven agregados sueltos.	75

NIVEL DE DETERIORO		
Bajo	Medio	Alto
0 -25	25 - 50	>50

Fuente: Autora (2023).

La **Tabla 21** presenta los pesos otorgados al indicador "Separación de la berma" el cual está relacionado al criterio "Otros daños" del requerimiento "Estructural". Algunas de las normativas empleadas para el desarrollo de este estudio no clasifican niveles de severidad para esta manifestación patológica, a pesar de esto, se han asignado pesos específicos a los parámetros para llevar a cabo su evaluación.

El parámetro utilizado para esta manifestación patológica es la abertura en milímetros del movimiento de la berma, se asigna un valor de severidad en función del tamaño de la abertura.

Tabla 21. Parámetros del indicador "Separación de la berma"

SEPARACIÓN DE LA BERMA		
Parámetro	Abertura de las patologías	Valoración
Movimiento de la berma	≤ 3 mm	25
	> 3 mm y ≤ 10 mm	50
	> 10 mm	75

NIVEL DE DETERIORO		
Bajo	Medio	Alto
0 -25	25 - 50	>50

Fuente: Autora (2023).

Los parámetros descritos en esta sección permiten valorar la severidad de las manifestaciones patológicas y asignar un valor específico en el momento de evaluar el estado de una vía. A pesar de que algunas normativas no categorizan los niveles de severidad para ciertas fallas, se les ha asignado un valor a los parámetros para poder realizar su evaluación de manera objetiva y precisa.

La aplicación de estos parámetros permite una evaluación más rigurosa del estado del pavimento y contribuye a una toma de decisión asertiva en mantenimiento y rehabilitación de una carpeta asfáltica.

4 ESTUDIO DE CASO: FOZ DO IGUAÇU

En el capítulo 3 se ha presentado la metodología utilizada para el desarrollo de este trabajo de conclusión de curso, la cual integra el análisis multicriterio junto con los sistemas de información geográfica para una mejora en la evaluación de pavimentos.

En esta sección se detalla el proceso seguido para la posterior obtención de resultados, y la forma de analizarlos para tomar decisiones en cuanto al mantenimiento y reparación de pavimentos.

Por lo tanto, esta sección presenta el proceso luego de la creación de la herramienta metodológica en donde el levantamiento de inspección visual se torna en la calibración del modelo de inspección. Se ha seleccionado la ciudad de Foz do Iguaçu donde se ha llevado a cabo la aplicación y comprobación de la herramienta metodológica.

4.1. LIMITES DEL ESTUDIO

Este estudio opto por el desarrollo de un modelo de evaluación de pavimentos flexibles en la ciudad de Foz do Iguaçu (Brasil) analizando vías urbanas mediante la teoría de decisión AHP con apoyo de un modelo multicriterio.

El estudio se ha llevado a cabo en la ciudad de Foz de Iguazú, en el estado de Paraná (Brasil), y se han analizado un total de 15 manifestaciones patológicas que influyen directamente en la durabilidad del pavimento, la comodidad del tráfico y la seguridad del trayecto.

En este estudio, se seleccionaron tramos de carretera de 500 metros de longitud para su análisis, con el fin de recopilar una cantidad significativa de datos. En total, se analizaron 10 vías urbanas en la ciudad de Foz do Iguaçu utilizando esta herramienta en el levantamiento de inspección visual.

La selección de estas avenidas correspondió al considerado flujo vehicular que poseen y a la importancia estratégica dentro del sistema vial de la ciudad. Es importante resaltar que estos tramos no representan en su totalidad las condiciones de los pavimentos flexibles en la ciudad y que existe la posibilidad de otras vías con diferentes características.

Se utilizaron dispositivos electrónicos no tripulados para inspeccionar 4 vías urbanas, con el objetivo de obtener información visual detallada sobre su estado actual. Los dispositivos volaron a una altura de 20 metros con respecto al pavimento flexible para la obtención de fotografías aéreas como método de inspección visual. Se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG) para visualizar los niveles de deterioro, creando mapas de

calor para cada tipo de problema encontrado.

4.2. LEVANTAMIENTO DE DATOS

El levantamiento de datos implica la recopilación de una variedad información de diversas formas, como observaciones, mediciones, análisis entre otros, con el objetivo de obtener una toma de decisiones más precisa. En esta sección se encuentra detallada la etapa de campo para la aplicación del modelo desarrollado.

4.2.1. Etapa de campo

Para la inspección visual se ha elegido un total de 10 vías en la ciudad de Foz do Iguaçu, presentadas en la **Tabla 22**. La selección de estas vías se debió a que experimentan un alto flujo vehicular y son más propensas a las deformaciones producidas por el tránsito de los vehículos.

Tabla 22. Vías urbanas seleccionadas para el caso de estudio.

Ciudad	Vías urbanas
Foz do Iguaçu-PR Brasil	1. Avenida Gramado
	2. Avenida Andradina
	3. Avenida Araucária
	4. Avenida Nacional
	5. Rua Guarujá
	6. Avenida Florianópolis
	7. Avenida Olímpico Rafagnin
	8. Rua Nilópolis
	9. Rua Manaus
	10. Rua D

Fuente: Autora (2023).

Las vías analizadas en el estudio cuentan con la siguiente delimitación geográfica, la Av. Gramado entre Av. Brodoski y Av. Andradina, la Av. Andradina entre Av. Gramado y Av. Araucária, la Av. Araucária entre Av. Andradina y Av. Garibaldi, la Av. Nacional entre Av. Rafagnin y Rua Ouro Preto, la Rua Guarujá entre Av. Gramado y Rua Barra Velha, la Av.

Florianópolis entre Rua Fortaleza y Rua Belo Horizonte, la Av. Olímpico Rafagnin entre Av. Nacional y Rua Frederico Bernardo Z, la Rua Nilópolis entre Rua Garibaldi y Rua Poços de Caldas, la Rua Manaus entre Rua A y Rua C, y la Rua D entre Rua Florianópolis y Rua Vila Velha.

El levantamiento de datos fue realizado a partir de un cuestionario online en formato de aplicativo web desarrollado por la Autora (ver **8 ANEXOS**). Este cuestionario consta de parámetros e imágenes que ayudan a recopilar información de manera eficiente. Cada parámetro está asociado con la asignación de pesos por grado de deterioro de la manifestación patológica. Esta valoración se detalla en la sección **3.2.3. Análisis y definición del grado de deterioro** y se resume en la **Tabla 23**.

Tabla 23. Intervalos de puntuación de los indicadores del estudio.

TABLAS DE PUNTUACIÓN				
INDICADORES	Bajo	Medio	Alto	Unidad de medición
1. Piel de cocodrilo	0 - 30	30 - 85	> 85	m ²
2. Fisura de bloque	0 - 15	15 - 30	> 30	m ²
3. Pulimento del agregado	0 - 15	15 - 25	> 25	m ²
4. Fisura de borde	0 - 5	5 - 35	> 35	m
5. Fisura longitudinal	0 - 15	15 - 30	> 30	m
6. Fisura por reflexión de juntas	0 - 15	15 - 30	> 30	m
7. Fisura transversal	0 - 15	15 - 30	> 30	m
8. Parches	0 - 25	25 - 35	> 35	m ²
9. Ahuellamiento	0 - 25	25 - 50	> 50	mm
10. Ondulación	0 - 15	15 - 35	> 35	m ²
11. Exudación	0 - 25	25 - 50	> 50	m ²
12. Afloramiento de finos	0 - 25	25 - 50	> 50	s/u
13. Baches	0 - 15	15 - 35	> 35	m ²
14. Pérdida del agregado	0 - 25	25 - 50	> 50	m ²
15. Separación de la Berma	0 - 25	25 - 50	> 50	m

Fuente: Autora (2023).

Con la ficha de levantamiento de datos se consigue una evaluación detallada y sistemática del estado de las manifestaciones patológicas existentes en determinada vía urbana, la identificación de áreas afectadas con un alto nivel de deterioro permite planificar el mantenimiento y reparación de manera eficiente.

La **Tabla 24** presenta las valoraciones de cada uno de los indicadores asociados al nivel de deterioro localizado durante el levantamiento. Se pueden observar valores

inicialmente encontrados, que oscilan entre 0 y 130 puntos, relativos a los intervalos inherentes a cada indicador inspeccionado, brindando las informaciones generales del levantamiento realizado. De la misma forma, durante el levantamiento se ha construido un catálogo fotográfico que permita representar las manifestaciones patológicas estudiadas en dichos deterioros del asfalto (ver **Figura 25** y **Figura 26**).

Tabla 24. Ficha de levantamiento de la Avenida Gramado

VIA 1		
Dirección: Av. Gramado/ entre Av. Brodoski y Av. Andradina		
Distancia analizada: 0.5 km.		
Hora inicio: 11:15:00		
Fecha: 29-04-2023		
Hora fin: 11:42:00		
INDICADORES	VALORACIÓN	NIVEL
Piel de cocodrilo	15	Bajo
Fisuración en bloques	130	Alto
Pulimento del agregado	15	Bajo
Fisuración de borde	0	Bajo
Fisuración Longitudinal	0	Bajo
Fisuración por reflexión de juntas	0	Bajo
Fisuración Transversal	30	Medio
Parches	45	Alto
Ahuellamiento	0	Bajo
Ondulación	0	Bajo
Exudación	25	Bajo
Afloramiento de finos	25	Bajo
Baches	40	Alto
Pérdida del agregado	25	Bajo
Separación de la berma	0	Bajo

Fuente: Autora (2023).

Figura 25. Manifestaciones patológicas en la Avenida Gramado



Fuente: Autora (2023).

Figura 26. Manifestaciones patológicas en la Avenida Gramado



Fuente: Autora (2023).

En la **Tabla 25** se presentan las valoraciones de cada uno de los indicadores relacionados al nivel de deterioro localizado durante el levantamiento. Los datos presentados se encuentran en un rango de 0 y 105 puntos y corresponden a los intervalos específicos de cada indicador analizado, brindando información general sobre el proceso de levantamiento realizado.

Tabla 25. Ficha de levantamiento de la Avenida Andradina

VIA 2		
Dirección: Avenida Andradina/ entre Av. Gramado y Av. Araucária		
Distancia analizada: 0.5 km.		
Hora inicio: 11:50:00		
Fecha: 29-04-2023		
Hora fin: 12:10:00		
INDICADORES	VALORACIÓN	NIVEL
Piel de cocodrilo	40	Medio
Fisuración en bloques	105	Alto
Pulimento del agregado	15	Bajo
Fisuración de borde	50	Alto
Fisuración Longitudinal	85	Alto
Fisuración por reflexión de juntas	0	Bajo
Fisuración Transversal	65	Alto
Parches	0	Bajo
Ahuellamiento	0	Bajo
Ondulación	0	Bajo
Exudación	25	Bajo
Afloramiento de finos	25	Bajo
Baches	0	Bajo
Pérdida del agregado	25	Bajo
Separación de la berma	0	Bajo

Fuente: Autora (2023).

La **Tabla 26** presenta las valoraciones de cada uno de los indicadores relacionados al nivel de deterioro localizado durante el levantamiento. Los datos presentados oscilan entre 0 y 150 puntos, asociados a los intervalos específicos de cada indicador analizado, otorgando información general sobre el proceso de levantamiento realizado. Además, durante el levantamiento se ha construido un catálogo fotográfico que permita representar las manifestaciones patológicas estudiadas en dichos deterioros del asfalto (ver **Figura 27** y **Figura 28**).

Tabla 26. Ficha de levantamiento de la Avenida Araucária

VIA 3		
Dirección: Avenida Araucária/ entre Av. Andradina y Av. Garibaldi		
Distancia analizada: 0.5 km.		
Hora inicio: 12:15:00		
Fecha: 29-04-2023		
Hora fin: 12:30:00		

INDICADORES	VALORACIÓN	NIVEL
Piel de cocodrilo	40	Medio
Fisuración en bloques	125	Alto
Pulimento del agregado	10	Bajo
Fisuración de borde	0	Bajo
Fisuración Longitudinal	0	Bajo
Fisuración por reflexión de juntas	0	Bajo
Fisuración Transversal	60	Alto
Parches	90	Alto
Ahuellamiento	0	Bajo
Ondulación	0	Bajo
Exudación	25	Bajo
Afloramiento de finos	0	Bajo
Baches	20	Medio
Pérdida del agregado	150	Alto
Separación de la berma	0	Bajo

Fuente: Autora (2023).

Figura 27. Manifestaciones patológicas en la Avenida Araucária



Fuente: Autora (2023).

Figura 28. Manifestaciones patológicas en la Avenida Araucária



Fuente: Autora (2023).

En la **Tabla 27** se exhiben las valoraciones de cada uno de los indicadores relacionados al nivel de deterioro localizado durante el levantamiento. Los datos presentados se encuentran en un rango de 0 y 100 puntos, relativos a los intervalos específicos de cada indicador analizado, brindando información general sobre el proceso de levantamiento realizado.

Tabla 27. Ficha de levantamiento de la Avenida Nacional

VIA 4		
Dirección: Av. Nacional/ entre Av. Rafagnin y Rua Ouro Preto		
Distancia analizada: 0.5 km.		
Hora inicio: 17:05:00		
Fecha: 29-04-2023		
Hora fin: 17:25:00		
INDICADORES	VALORACIÓN	NIVEL
Piel de cocodrilo	55	Medio
Fisuración en bloques	45	Alto
Pulimento del agregado	25	Medio
Fisuración de borde	0	Bajo
Fisuración Longitudinal	50	Alto
Fisuración por reflexión de juntas	0	Bajo
Fisuración Transversal	75	Alto
Parches	15	Bajo
Ahuellamiento	0	Bajo
Ondulación	50	Alto
Exudación	0	Bajo
Afloramiento de finos	0	Bajo
Baches	0	Bajo
Pérdida del agregado	100	Alto
Separación de la berma	0	Bajo

Fuente: Autora (2023).

La **Tabla 28** muestra las valoraciones de cada uno de los indicadores asociados al nivel de deterioro localizado durante el levantamiento. Los datos presentados oscilan de entre 0 a 135 puntos, relacionados a los intervalos específicos de cada indicador analizado, brindando información general sobre el proceso de levantamiento realizado. Asimismo, durante el levantamiento se ha construido un catálogo fotográfico que permita representar

las manifestaciones patológicas estudiadas en dichos deterioros del asfalto (ver **Figura 29** y **Figura 30**).

Tabla 28. Ficha de levantamiento de la Rua Guarujá

VIA 5		
Dirección: Rua Guarujá/ entre Av. Gramado y Rua Barra Velha		
Distancia analizada: 0.5 km.		
Hora inicio: 17:29:00		
Fecha: 29-04-2023		
Hora fin: 17:45:00		
INDICADORES	VALORACIÓN	NIVEL
Piel de cocodrilo	100	Alto
Fisuración en bloques	45	Alto
Pulimento del agregado	0	Bajo
Fisuración de borde	55	Alto
Fisuración Longitudinal	65	Alto
Fisuración por reflexión de juntas	0	Bajo
Fisuración Transversal	10	Bajo
Parches	135	Alto
Ahuellamiento	0	Bajo
Ondulación	35	Medio
Exudación	0	Bajo
Afloramiento de finos	0	Bajo
Baches	5	Bajo
Pérdida del agregado	0	Bajo
Separación de la berma	0	Bajo

Fuente: Autora (2023).

Figura 29. Manifestaciones patológicas en la Rua Guarujá



Fuente: Autora (2023).

Figura 30. Manifestaciones patológicas en la Rua Guarujá

Fuente: Autora (2023).

En la **Tabla 29** se presentan las valoraciones de cada uno de los indicadores relacionados al nivel de deterioro localizado durante el levantamiento. Los datos presentados se encuentran en un rango de 0 a 180 puntos, referentes a los intervalos de cada indicador analizado, ofreciendo información general sobre el proceso de levantamiento realizado.

Tabla 29. Ficha de levantamiento de la Avenida Florianópolis

VIA 6		
Dirección: Av. Florianópolis/ entre R. Fortaleza y R. Belo Horizonte		
Distancia analizada: 0.5 km.		
Hora inicio: 09:35:00		
Fecha: 05-11-2022		
Hora fin: 10:15:00		
INDICADORES	VALORACIÓN	NIVEL
Piel de cocodrilo	85	Medio
Fisuración en bloques	180	Alto
Pulimento del agregado	25	Medio
Fisuración de borde	75	Alto
Fisuración Longitudinal	100	Alto
Fisuración por reflexión de juntas	0	Bajo
Fisuración Transversal	75	Alto
Parches	60	Alto
Ahuellamiento	0	Bajo
Ondulación	0	Bajo

Exudación	0	Bajo
Afloramiento de finos	0	Bajo
Baches	65	Alto
Pérdida del agregado	75	Alto
Separación de la berma	0	Bajo

Fuente: Autora (2023).

La **Tabla 30** presenta las valoraciones de cada uno de los indicadores relacionados al nivel de deterioro localizado durante el levantamiento. Los datos presentados oscilan de 0 a 150 puntos, relativos a los intervalos específicos de cada indicador analizado, ofreciendo información general sobre el proceso de levantamiento realizado.

Tabla 30. Ficha de levantamiento de la Avenida Olímpico Rafagnin

VIA 7		
Dirección: Av. Olímpico Rafagnin/ entre Av. Nacional y R. Frederico Bernardo Z.		
Distancia analizada: 0.5 km.		
Hora inicio: 08:50:00		
Fecha: 05-11-2022		
Hora fin: 09:20:00		
INDICADORES	VALORACIÓN	NIVEL
Piel de cocodrilo	100	Alto
Fisuración en bloques	25	Medio
Pulimento del agregado	60	Alto
Fisuración de borde	35	Bajo
Fisuración Longitudinal	125	Alto
Fisuración por reflexión de juntas	0	Bajo
Fisuración Transversal	35	Alto
Parches	125	Alto
Ahuellamiento	0	Bajo
Ondulación	15	Bajo
Exudación	0	Bajo
Afloramiento de finos	75	Alto
Baches	70	Alto
Pérdida del agregado	150	Alto
Separación de la berma	0	Bajo

Fuente: Autora (2023).

La **Tabla 31** presenta las valoraciones de cada uno de los indicadores asociados al nivel de deterioro localizado durante el levantamiento. Se pueden observar valores inicialmente encontrados, que oscilan entre 0 a 140 puntos, relativos a los intervalos inherentes a cada indicador inspeccionado, brindando las informaciones generales del levantamiento realizado. De la misma forma, durante el levantamiento se ha construido un catálogo fotográfico que permita representar las manifestaciones patológicas estudiadas en dichos deterioros del asfalto (ver **Figura 31**).

Tabla 31. Ficha de levantamiento de la Rua Nilópolis

VIA 8		
Dirección: Rua Nilópolis/ entre R. Garibaldi y R. Poços de Caldas		
Distancia analizada: 0.5 km.		
Hora inicio: 17:30:00		
Fecha: 30-04-2022		
Hora fin: 17:45:00		
INDICADORES	VALORACIÓN	NIVEL
Piel de cocodrilo	50	Medio
Fisuración en bloques	0	Bajo
Pulimento del agregado	0	Bajo
Fisuración de borde	85	Alto
Fisuración Longitudinal	0	Bajo
Fisuración por reflexión de juntas	0	Bajo
Fisuración Transversal	0	Bajo
Parches	0	Bajo
Ahuellamiento	75	Alto
Ondulación	140	Alto
Exudación	0	Bajo
Afloramiento de finos	0	Bajo
Baches	0	Bajo
Pérdida del agregado	0	Bajo
Separación de la berma	0	Bajo

Fuente: Autora (2023).

Figura 31. Manifestaciones patológicas en la Rua Nilópolis

Fuente: Autora (2023).

En la **Tabla 32** se presentan las valoraciones de cada uno de los indicadores relacionados al nivel de deterioro localizado durante el levantamiento. Los datos presentados se encuentran en un rango de 0 a 125 puntos, referentes a los intervalos de cada indicador analizado, brindando información general sobre el proceso de levantamiento realizado.

Tabla 32. Ficha de levantamiento de la Rua Manaus

VIA 9		
Dirección: Rua Manaus/entre Rua A y Rua D		
Distancia analizada: 0.5 km.		
Hora inicio: 17:05:00		
Fecha: 30-04-2022		
Hora fin: 17:20:00		
INDICADORES	VALORACIÓN	NIVEL
Piel de cocodrilo	50	Medio
Fisuración en bloques	0	Bajo
Pulimento del agregado	0	Bajo
Fisuración de borde	65	Alto
Fisuración Longitudinal	0	Bajo

Fisuración por reflexión de juntas	0	Bajo
Fisuración Transversal	0	Bajo
Parches	0	Bajo
Ahuellamiento	125	Alto
Ondulación	0	Bajo
Exudación	0	Bajo
Afloramiento de finos	0	Bajo
Baches	0	Bajo
Pérdida del agregado	0	Bajo
Separación de la berma	25	Bajo

Fuente: Autora (2023).

La **Tabla 33** muestra las valoraciones de cada uno de los indicadores asociados al nivel de deterioro localizado durante el levantamiento. Los datos presentados oscilan de entre 0 a 125 puntos, relacionados a los intervalos específicos de cada indicador analizado, brindando información general sobre el proceso de levantamiento realizado. Asimismo, durante el levantamiento se ha construido un catálogo fotográfico que permita representar las manifestaciones patológicas estudiadas en dichos deterioros del asfalto (ver **Figura 32**).

Tabla 33. Ficha de levantamiento de la Rua D

VIA 10		
Dirección: Rua D/ entre Rua Florianópolis y Rua Vila Velha		
Distancia analizada: 0.5 km.		
Hora inicio: 17:35:00		
Fecha: 30-04-2022		
Hora fin: 17:55:00		
INDICADORES	VALORACIÓN	NIVEL
Piel de cocodrilo	50	Medio
Fisuración en bloques	0	Bajo
Pulimento del agregado	0	Bajo
Fisuración de borde	65	Alto
Fisuración Longitudinal	0	Bajo
Fisuración por reflexión de juntas	0	Bajo
Fisuración Transversal	0	Bajo
Parches	0	Bajo
Ahuellamiento	125	Alto
Ondulación	0	Bajo
Exudación	0	Bajo
Afloramiento de finos	0	Bajo

Baches	0	Bajo
Pérdida del agregado	0	Bajo
Separación de la berma	25	Bajo

Fuente: Autora (2023).

Figura 32. Manifestaciones patológicas en la Rua D



Fuente: Autora (2023).

Por otro lado, en la **Tabla 34** se presenta un resumen general de los niveles de severidad obtenidos por indicadores en las 10 vías urbanas analizadas en este estudio. Esta tabla muestra información acerca de la calidad de las vías y posibles vías con urgencia de intervención.

Tabla 34. Resumen de los niveles de severidad encontrados por indicador en las vías analizadas.

INDICADORES	VÍAS URBANAS									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Piel de cocodrilo	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Yellow	Red	Yellow	Yellow	Yellow
Fisuración en bloques	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Yellow	Green	Green	Red
Pulimento del agregado	Green	Green	Green	Yellow	Green	Yellow	Red	Green	Green	Yellow
Fisuración de borde	Green	Red	Green	Green	Red	Red	Green	Red	Red	Green
Fisuración Longitudinal	Green	Red	Green	Red	Red	Red	Red	Green	Green	Green
Fisuración por reflexión de juntas	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Fisuración Transversal	Yellow	Red	Red	Red	Green	Red	Red	Green	Green	Red
Parches	Red	Green	Red	Green	Red	Red	Red	Green	Green	Red
Ahuellamiento	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Green
Ondulación	Green	Green	Green	Red	Yellow	Green	Green	Red	Green	Green
Exudación	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Afloramiento de finos	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Green	Green	Green
Baches	Red	Green	Yellow	Green	Green	Red	Red	Green	Green	Green
Pérdida del agregado	Green	Green	Red	Red	Green	Red	Red	Green	Green	Green
Separación de la berma	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green

NIVEL DE DETERIORO		
Bajo	Medio	Alto

Fuente: Autora (2023).

Con relación a los resultados presentados en las fichas de levantamientos, se destaca que la media de tiempo del levantamiento fue de 23 minutos, esto representa el promedio de tiempo que tomó en ser realizada la inspección visual de las vías.

La evaluación cuantitativa del grado de deterioro a partir del uso de la ficha de levantamiento y la obtención de niveles de severidad de cada indicador en cada vía varían desde bajo hasta alto. Esta información es de utilidad para una toma de decisión de la administración pública, enfocándose en las vías que presentan niveles de severidad mayores.

4.2.2. Uso de dispositivos electrónicos no tripulados

En este trabajo de conclusión de curso se implementó el uso del dispositivo electrónico no tripulado para la detección y comparación de manifestaciones patológicas, permitiendo el ahorro en tiempos de inspección.

El dispositivo electrónico no tripulado Mavic Pro Combo Fly de la marca DJI (ver **Figura 33**) realizó vuelos a una altura de 20 metros sobre la superficie del asfalto para tomar fotografías y recopilar datos para la inspección y detección de manifestaciones patológicas de 4 vías urbanas de la ciudad de Foz do Iguaçu, presentadas en la **Tabla 35**.

Tabla 35. Vías urbanas analizadas con el uso de dispositivos electrónicos no tripulados.

Ciudad	Vías urbanas
Foz do Iguaçu-PR Brasil	1. Avenida Gramado
	2. Avenida Araucária
	3. Avenida Florianópolis
	4. Avenida Olímpico Rafagnin

Fuente: Autora (2023).

Figura 33. Dispositivo electrónico no tripulado Mavic Pro DJI.



Fuente: Autora (2023).

La altura de vuelo óptima para el análisis de las manifestaciones patológicas en vías urbanas se determinó a partir del estudio del GSD (*Ground Sample Distance*), que hace referencia a la distancia física en el terreno correspondiente a un píxel en la imagen capturada por el dron.

Para la selección del GSD se realizó el análisis de la resolución espacial de las imágenes capturadas por el dron en vuelos pilotos realizados a distintas alturas (10, 20 y 30 metros), luego de analizar los resultados, se determinó que una altura de 20 metros en relación con el nivel del suelo era la más adecuada para el análisis de las manifestaciones patológicas (ver **Fotografía 1**).

Fotografía 1. Levantamiento piloto Avenida Gramado a 20 metros de altura.



Fuente: Autora (2023).

El dron Mavic Pro Combo Fly de la marca DJI captura videos en 4K y fotos de alta resolución de 12 megapíxeles, con la capacidad de capturar fotos complejas sin mucho esfuerzo, la cámara gimbal de 3 ejes permite estabilizar la imagen y obtener tomas suaves y estables durante el vuelo, cuenta con un sensor CMOS de $\frac{1}{2}, 3''$ y un lente con apertura $f/2.2$ que permite capturar imágenes nítidas y detalladas. Además, cuenta con un sistema de posicionamiento GPS por satélite y un peso de 734 gramos, lo que le permite realizar vuelos con una velocidad máxima de 65 km/h.

La capacidad de almacenamiento del dron dependerá de la tarjeta de memoria que se inserte, la duración máxima del vuelo es de 27 minutos, mientras que la duración de su batería es de aproximadamente 30 minutos, lo que permite un uso prolongado durante las sesiones de vuelo. Además, este modelo permite el uso de un aplicativo de control DJI GO 4, una aplicación móvil diseñada especialmente para los dispositivos DJI, que permite controlar la cámara y otras funciones del dispositivo electrónico no tripulado.

Con las imágenes aéreas obtenidas por medio del dron se ha realizado la construcción de un catálogo para representar las manifestaciones patológicas de las vías urbanas levantadas en la ciudad de Foz do Iguaçu, en las **Fotografía 2** y **Fotografía 3** se presentan el levantamiento aéreo de la Avenida Gramado.

Fotografía 2. Levantamiento aéreo de la Avenida Gramado



Fuente: Autora (2023).

Fotografía 3. Levantamiento aéreo de la Avenida Gramado



Fuente: Autora (2023).

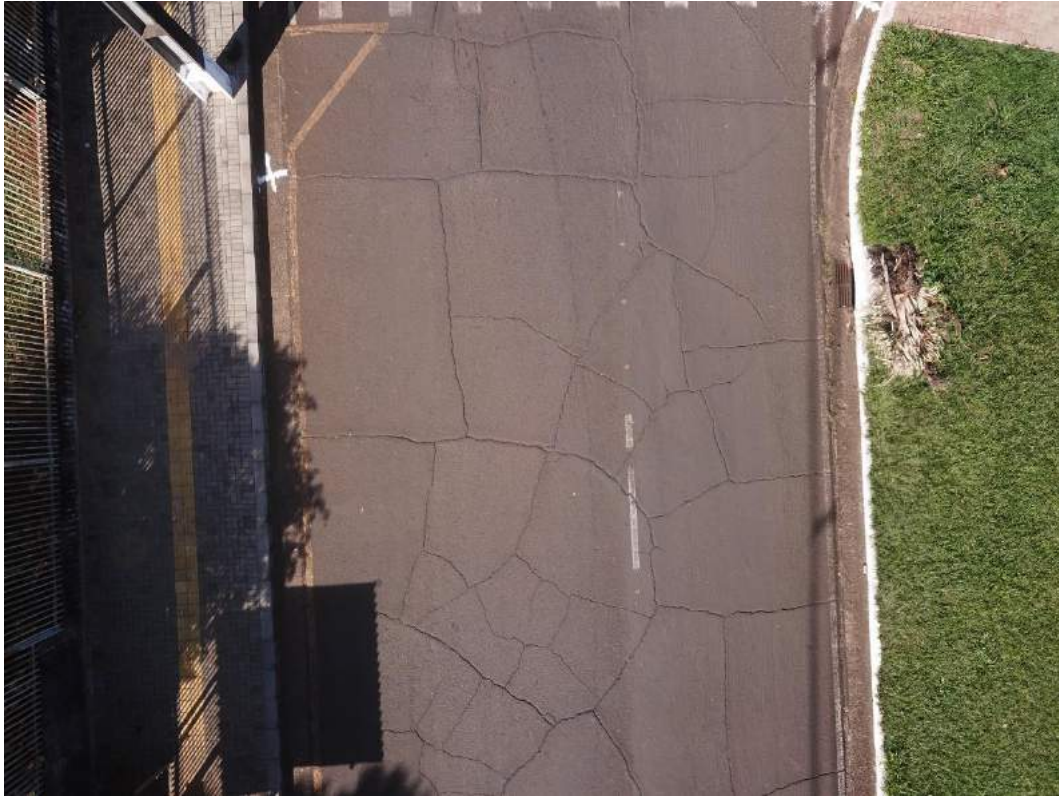
Con la ayuda de drones se obtienen imágenes aéreas detalladas que permiten evaluar el nivel de deterioro del asfalto al crear catálogos fotográficos de las diferentes manifestaciones patológicas, en las **Fotografía 4** y **Fotografía 5** se observa la Avenida Araucária.

Fotografía 4. Levantamiento aéreo de la Avenida Araucária



Fuente: Autora (2023).

Fotografía 5. Levantamiento aéreo de la Avenida Araucária



Fuente: Autora (2023).

En las **Fotografía 6** y **Fotografía 7** se observa el levantamiento de la Avenida Florianópolis. Al examinar las imágenes aéreas es posible obtener una comprensión más precisa de la naturaleza y la extensión de los problemas en el asfalto.

Fotografía 6. Levantamiento aéreo de la Avenida Florianópolis



Fuente: Autora (2023).

Fotografía 7. Levantamiento aéreo de la Avenida Florianópolis



Fuente: Autora (2023).

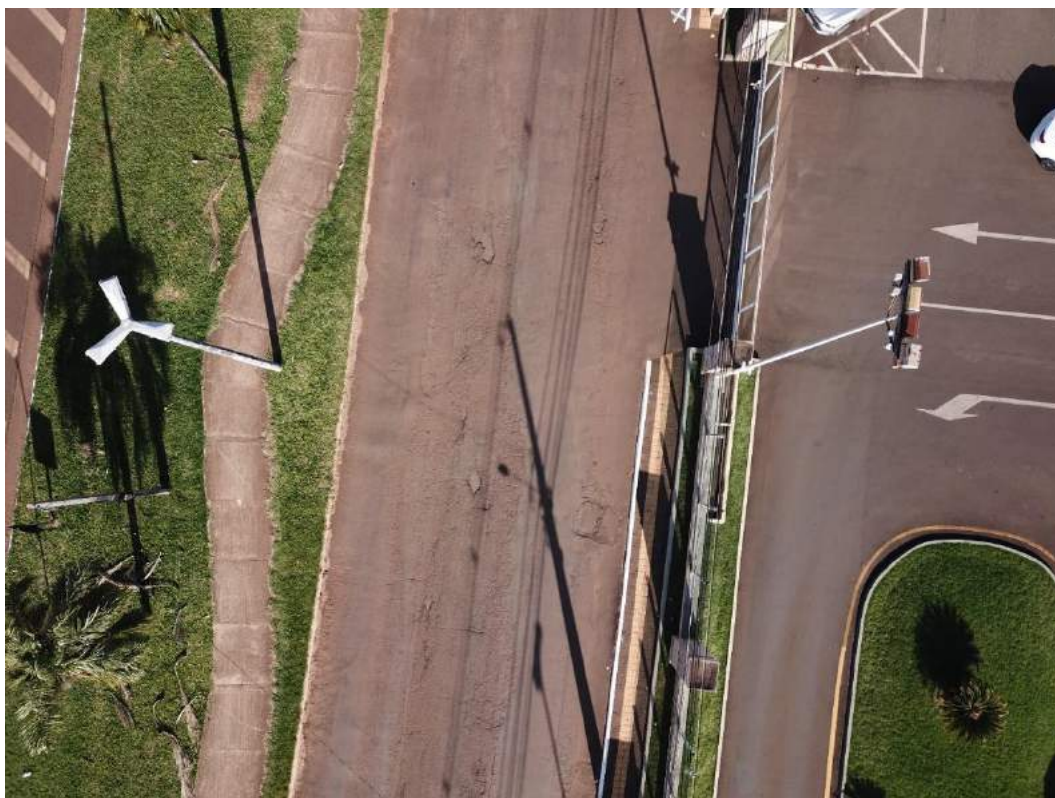
Con las imágenes obtenidas por el dron podemos comprender mejor la naturaleza y el alcance de las manifestaciones patológicas del asfalto, lo que nos permite planificar medidas de reparación y mantenimiento adecuadas. En las **Fotografía 8** y **Fotografía 9** se encuentra el levantamiento aéreo de la Avenida Olímpico Rafagnin.

Fotografía 8. Levantamiento aéreo de la Avenida Olímpico Rafagnin



Fuente: Autora (2023).

Fotografía 9. Levantamiento aéreo de la Avenida Olímpico Rafagnin



Fuente: Autora (2023).

Cada vía designada para el vuelo generó entre 30 a 100 fotografías dependiendo del área de interés del estudio, enfocado a las diversas manifestaciones patológicas halladas en las vías, de las cuales fueron seleccionadas 2 fotografías por vía para realizar el análisis de las manifestaciones patológicas.

Estos catálogos fotográficos son útiles para tener un registro histórico de los daños y la evolución de la manifestación patológicas a través del tiempo, lo que permite una planificación más adecuada de las medidas a ser tomadas en el ámbito de la reparación o mantenimiento de las vías urbanas.

4.2.3. Sistemas de Información Geográfica

Las imágenes obtenidas por el dron pueden ser procesadas utilizándose una configuración básica requerida para manejar una cantidad de datos pesados como lo es el procesamiento de imágenes de alta resolución.

La configuración básica recomendada para realizar este procesamiento es contar con al menos 16 a 32 GB de RAM, una CPU de 4 a 8 núcleos Intel o AMD de 2.0+ GHz, y

una GPU NVIDIA o AMD con 700+ CUDA cores o unidades de procesamiento de shader. Ejemplos de tarjetas gráficas que cumplen con estos requisitos son la GeForce GTX 1080 o la Radeon RX 5700.

Para representar las manifestaciones patológicas en los mapas producidos se creó una leyenda (ver **Tabla 36**), de manera que pudieran ser identificadas durante el procesamiento. A cada patología se le asignó un color específico para mejorar su visualización durante la interpretación de resultados, tanto en la leyenda como en el procesamiento de los mapas.

Tabla 36. Leyenda adoptada para el procesamiento de imágenes.

REQUERIMIENTOS	CRITERIOS	PATOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
Confort	Fisuras	1- Piel de cocodrilo	
		2- Fisura de bloque	
	Daños superficiales	3- Pulimento del agregado (PU)	
Funcional	Fisuras	4- Fisura de borde	
		5- Fisura longitudinal	
		6- Fisura por reflexión de juntas	
		7- Fisura transversal	
	Parches y baches	8- Parches	
	Deformaciones superficiales	9- Ahuellamiento	
		10- Ondulación (OND)	
		11- Exudación	
	Otros daños	12- Afloramiento de finos	
Estructural	Parches y baches	13- Baches	
	Daños superficiales	14- Pérdida del agregado	
	Otros daños	15- Separación de la berma	

Fuente: Autora (2023).

Al procesar imágenes aéreas de alta resolución es necesario tener una precisión con las coordenadas que son utilizadas para generar los ortomosaicos. Por ello se empleó un sistema RTK (*Real Time Kinematic*) denominado GEOMAX ZENITH-15, que utiliza varias constelaciones de satélites (GPS, GLONASS, BEIDU, SBAS), junto con tecnología UHF y GSM, que permiten una lectura de 120 canales GNSS (*Global Navigation Satellite System*).

El programa Agisoft Metashape Pro, versión 1.18.3 fue utilizado para procesar las imágenes y obtener ortomosaicos georreferenciados, así como MDEs (modelo digital de

elevación) y MDS (modelo digital de superficie), curvas de nivel y archivos de extensión KML (*Keyhole Markup Language*).

Las coordenadas obtenidas a partir del GNSS establecen el posicionamiento espacial autónomo, utilizando los satélites artificiales RTK para la correlación de las fotografías. La precisión milimétrica de los puntos colectados por el RTK es necesario para la correlación entre la altura ortométrica y la generación de los ortomosaicos. Y finalmente se empleó el uso del programa Quantum Gis (QGis) versión 3.16 (LTR) para crear los mapas de las manifestaciones patológicas previamente clasificadas según los indicadores empleados en este estudio.

5 ANALISIS DE RESULTADOS

En el capítulo 4 se detalló la aplicación de la herramienta metodológica desarrollada en la ciudad de Foz do Iguaçu. Se llevaron a cabo el levantamiento de inspección visual y el levantamiento aéreo con el dispositivo electrónico no tripulado, obteniendo así una información valiosa para la cuantificación de manifestaciones patológicas. Además, se mencionan las principales características del procesamiento de imágenes, desde la obtención de las fotografías aéreas hasta la creación de mapas georreferenciados.

Esta sección contiene los resultados obtenidos a partir del análisis de los datos recopilados, permitiendo la evaluación de la condición de la capa de rodadura y la determinación del índice de deterioro patológico (IDP).

5.1. ÍNDICE DE DETERIORO PATOLÓGICO (IDP)

El índice de deterioro patológico busca identificar la vía urbana que se encuentra con una mayor necesidad de intervención, ya sea con un mantenimiento o reparación en totalidad de esta, con el fin de prevenir o corregir daños mayores para garantizar la funcionalidad y seguridad de los usuarios.

La obtención del valor del Índice de deterioro patológico (IDP) consiste en la suma ponderada de los daños descubiertos en el levantamiento de la superficie asfáltica. Para esto se asigna un peso específico a cada tipo de manifestación patológica mediante el estudio metodológico desarrollado (ver **Tabla 6**) multiplicado con el nivel de severidad de la manifestación patológica identificada en el levantamiento de inspección visual (ver desde **Tabla 7** a **Tabla 21**). A continuación, se encuentra la expresión del Índice de deterioro patológico:

$$IDP = \sum_{i=1}^n (A_i * B_i + \dots + A_n * B_n) \quad (4)$$

Donde:

IDP = Índice de deterioro patológico.

A_i = Peso de las manifestaciones patológicas (ver **Tabla 6**).

B_i = Nivel de intensidad del daño de la manifestación patológica (ver desde **Tabla 7** a **Tabla 21**).

El parámetro A_i cambia dependiendo de la manifestación patológica hallada en el

levantamiento de inspección visual y el parámetro B_i está directamente relacionado a dicha manifestación patológica, ya que varía dependiendo del nivel de afectación que posea la vía conforme el nivel de deterioro de la vía urbana.

Cada variable que compone la formación del índice cuenta con los parámetros adecuados para la asignación de un nivel de deterioro que pueda ayudar en la toma de decisión de la administración pública.

5.1.1. Resultados obtenidos en campo con la inspección visual

El parámetro A_i asignado por la revisión de la literatura atribuye los pesos a las manifestaciones patológicas dependiendo del grupo de criterios al cual pertenezca y dentro de cuál de los requerimientos se encuentre establecido, esos pesos son presentados en la **Tabla 37**.

Tabla 37. Pesos atribuidos al árbol de requerimientos.

Requerimientos	Peso	Criterios	Peso	Indicadores	Peso
Conforto	0,15	Fisuras	0,65	Piel de cocodrilo	0,35
				Fisuración en bloques	0,65
		Defectos de la superficie	0,35	Pulimiento del agregado	1,00
Funcional	0,3	Fisuras	0,25	Fisuración de borde	0,20
				Fisuración longitudinal	0,30
				Fisuración por reflexión de juntas	0,25
				Fisuración transversal	0,25
		Baches y Parches	0,3	Parches	1,00
		Deformación Superficial	0,2	Ahuellamiento	0,35
				Ondulación	0,40
		Otros daños	0,25	Exudación	0,25
Estructural	0,55	Baches y Parches	0,45	Afloramiento de finos	1,00
				Baches	1,00
		Deformación Superficial	0,2	Pérdida del agregado	1,00
		Otros daños	0,35	Separación de la Berma	1,00

Fuente: Autora (2023).

Por lo tanto, a cada indicador se le atribuye un determinado peso que es resultado del grupo de requerimiento y criterio al que pertenece, conforme se presenta en la **Tabla 38**, que conforma el parámetro A_i del índice de deterioro patológico.

Tabla 38. Peso total por Indicador

INDICADORES	PESOS
Piel de cocodrilo	0,034
Fisuración en bloques	0,063
Pulimento del agregado	0,053
Fisuración de borde	0,015
Fisuración Longitudinal	0,023
Fisuración por reflexión de juntas	0,019
Fisuración Transversal	0,019
Parches	0,090
Ahuellamiento	0,021
Ondulación	0,024
Exudación	0,015
Afloramiento de finos	0,075
Baches	0,248
Pérdida del agregado	0,110
Separación de la berma	0,193

Fuente: Autora (2023).

Para la correcta aplicación del índice de deterioro patológico, es necesario contar con el nivel de intensidad de las manifestaciones patológicas (parámetro B_i), la **Tabla 39** representa el resultado del nivel de intensidad de los diferentes indicadores de la inspección visual realizada en el estudio de caso aplicado a la ciudad de Foz de Iguaçu, en el cual se analizaron 10 vías urbanas (ver desde **Tabla 24** a **Tabla 33**). Cada indicador cuenta con un intervalo de nivel de intensidad (bajo, medio o alto) según la valoración atribuida en campo.

Tabla 39. Resultado del nivel de intensidad del daño por indicador en la inspección visual.

INDICADORES	VÍAS URBANAS									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Piel de cocodrilo	15	40	40	55	100	85	100	50	50	55
Fisuración en bloques	130	105	125	45	45	180	25	0	0	75
Pulimento del agregado	15	15	10	25	0	25	60	0	0	25
Fisuración de borde	0	50	0	0	55	75	35	85	65	0
Fisuración Longitudinal	0	85	0	50	65	100	125	0	0	5
Fisuración por reflexión de juntas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fisuración Transversal	30	65	60	75	10	75	35	0	0	65

Parches	45	0	90	15	135	60	125	0	0	100
Ahuellamiento	0	0	0	0	0	0	0	75	125	25
Ondulación	0	0	0	50	35	0	15	140	0	5
Exudación	25	25	25	0	0	0	0	0	0	0
Afloramiento de finos	25	25	0	0	0	0	75	0	0	0
Baches	40	0	20	0	5	65	70	0	0	0
Pérdida del agregado	25	25	150	100	0	75	150	0	0	0
Separación de la berma	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0

Fuente: Autora (2023).

Las vías urbanas analizadas son: 1. Avenida Gramado, 2. Avenida Andradina, 3. Avenida Araucária, 4. Avenida Nacional, 5. Rua Guarujá, 6. Avenida Florianópolis, 7. Avenida Olímpico Rafagnin, 8. Rua Nilópolis, 9. Rua Manaus y 10. Rua D (ver **Tabla 22**).

Para la aplicación de la ecuación 4 se utilizan valores adimensionales de la **Tabla 38** y de la **Tabla 39** para poder obtener el índice de deterioro patológico de las vías urbanas analizadas en la ciudad de Foz do Iguaçu, los resultados por indicadores se presentan en la **Tabla 40**.

Tabla 40. Índice de deterioro patológico de cada INDICADOR por vía urbana.

INDICADORES	VÍAS URBANAS									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Piel de cocodrilo	0,51	1,37	1,37	1,88	3,41	2,90	3,41	1,71	1,71	1,88
Fisuración en bloques	8,24	6,65	7,92	2,85	2,85	11,41	1,58	0	0	4,75
Pulimento del agregado	0,79	0,79	0,53	1,31	0	1,31	3,15	0	0	1,31
Fisuración de borde	0	0,75	0	0	0,83	1,13	0,53	1,28	0,98	0
Fisuración Longitudinal	0	1,91	0	1,13	1,46	2,25	2,81	0	0	0,11
Fisuración por reflexión de juntas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fisuración Transversal	0,56	1,22	1,13	1,41	0,19	1,41	0,66	0	0	1,22
Parches	4,05	0,00	8,10	1,35	12,15	5,40	11,25	0	0	9,00

Ahuellamiento	0	0	0	0	0	0	0	1,58	2,63	0,53
Ondulación	0	0	0	1,20	0,84	0	0,36	3,36	0	0,12
Exudación	0,38	0,38	0,38	0	0	0	0	0	0	0
Afloramiento de finos	1,88	1,88	0	0	0	0	5,63	0	0	0
Baches	9,90	0	4,95	0	1,24	16,09	17,33	0	0	0
Pérdida del agregado	2,75	2,75	16,50	11,00	0	8,25	16,50	0	0	0
Separación de la berma	0	0	0	0	0	0	0	0	4,81	0

Fuente: Autora (2023).

Los resultados por criterios del índice de deterioro patológico de las vías urbanas analizadas en la ciudad de Foz do Iguaçu se encuentran indicados en la **Tabla 41**.

Tabla 41. Índice de deterioro patológico de cada CRITERIO por vía urbana.

CRITERIOS	VÍAS URBANAS									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fisuras	8,75	8,02	9,29	4,73	6,26	14,31	5,00	1,71	1,71	6,63
Daños Superficiales	0,79	0,79	0,53	1,31	0	1,31	3,15	0	0	1,31
Fisuras	0,56	3,88	1,13	2,53	2,48	4,78	3,99	1,28	0,98	1,33
Baches y Parches	4,05	0	8,10	1,35	12,15	5,40	11,25	0	0	9,00
Deformaciones Superficiales	0,38	0,38	0,38	1,20	0,84	0	0,36	4,94	2,63	0,65
Otros daños	1,88	1,88	0	0	0	0	5,63	0	0	0
Baches y Parches	9,90	0	4,95	0	1,24	16,09	17,33	0	0	0
Daños Superficiales	2,75	2,75	16,50	11,00	0	8,25	16,50	0	0	0
Otros daños	0	0	0	0	0	0	0	0	4,81	0

Fuente: Autora (2023).

Seguidamente se presenta la **Tabla 42** en donde se expresan los valores totales por requerimientos obtenidos por medio del índice de deterioro patológico de las vías urbanas analizadas en la ciudad de Foz do Iguaçu.

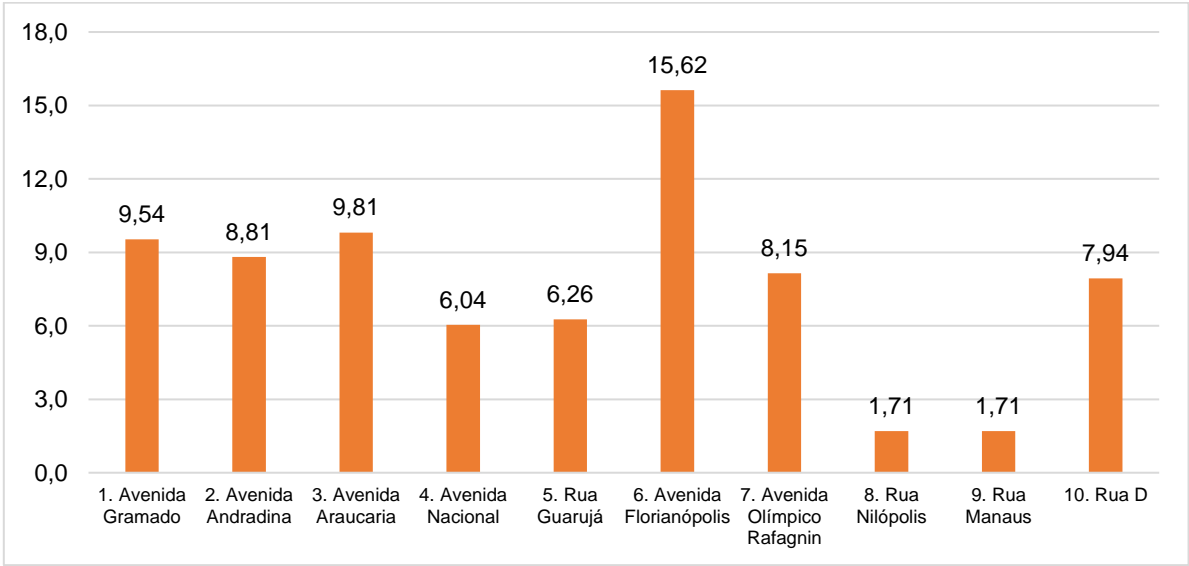
Tabla 42. Índice de deterioro patológico de cada REQUERIMIENTO por vía urbana.

Vías Urbanas	REQUERIMIENTOS		
	Confort	Funcional	Estructural
1	9,54	6,86	12,65
2	8,81	6,13	2,75
3	9,81	9,60	21,45
4	6,04	5,08	11,00
5	6,26	15,47	1,24
6	15,62	10,18	24,34
7	8,15	21,23	33,83
8	1,71	6,21	0
9	1,71	3,60	4,81
10	7,94	10,98	0

Fuente: Autora (2023).

En la **Figura 34** se muestra los resultados del índice de deterioro patológico obtenido para el requerimiento “confort” en las 10 vías urbanas analizadas. Se puede observar que la severidad de valores varia en un rango de 1.71 a 15.62, siendo la Avenida Florianópolis la vía más afectada en términos de brindar confort.

Figura 34. Índice de deterioro patológico para el requerimiento “confort” por vía urbana.

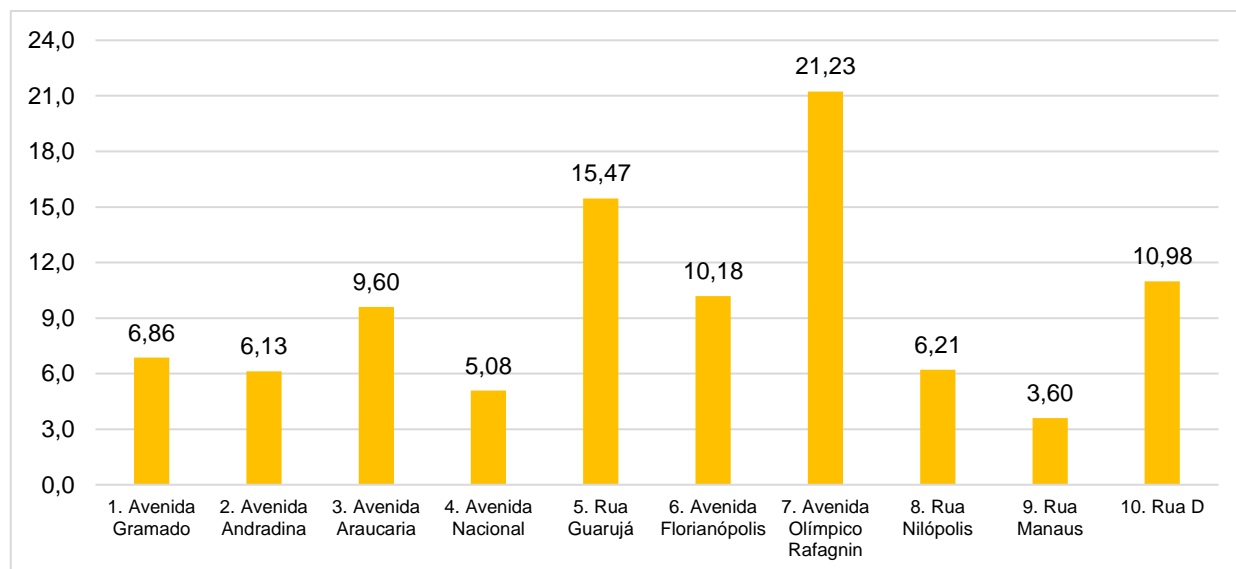


Fuente: Autora (2023).

Los resultados del índice de deterioro patológico para el requerimiento “funcional” en las 10 vías urbanas analizadas se muestran en la **Figura 35**. Se puede apreciar que la

severidad de los valores oscila entre 3.60 y 21.23, siendo la Avenida Olímpico Rafagnin la vía con mayores problemas en términos de funcionalidad.

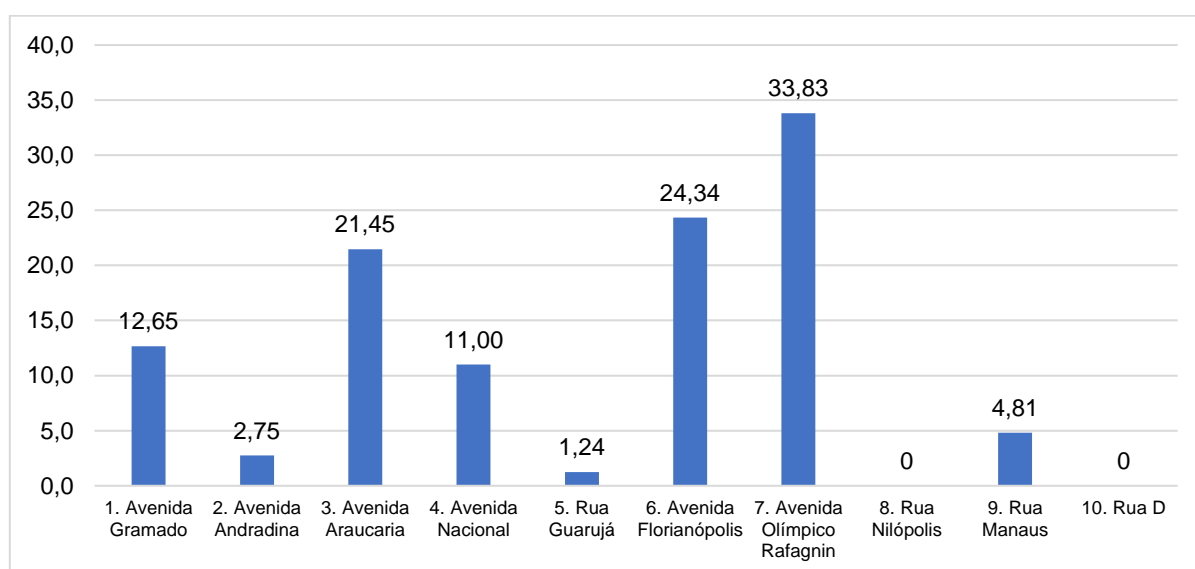
Figura 35. Índice de deterioro patológico para el requerimiento "funcional" por vía urbana.



Fuente: Autora (2023).

En la **Figura 36** se presentan los resultados del índice de deterioro patológico obtenido en el requerimiento "estructural" para las 10 vías urbanas analizadas. Se observa que la severidad de valores varía en un rango de 0 a 33.83, y se identifica que la Avenida Olímpico Rafagnin y la Avenida Florianópolis son las vías con mayores problemas en términos de afectaciones estructurales.

Figura 36. Índice de deterioro patológico para el requerimiento "estructural" por vía urbana.



Fuente: Autora (2023).

Luego de calcular el índice de deterioro patológico por requerimientos, se lleva a cabo el cálculo final por vía urbana, en donde obtenemos el nivel final de deterioro de la vía como se presenta en la **Tabla 43**.

Tabla 43. Índice de deterioro patológico final por vía urbana.

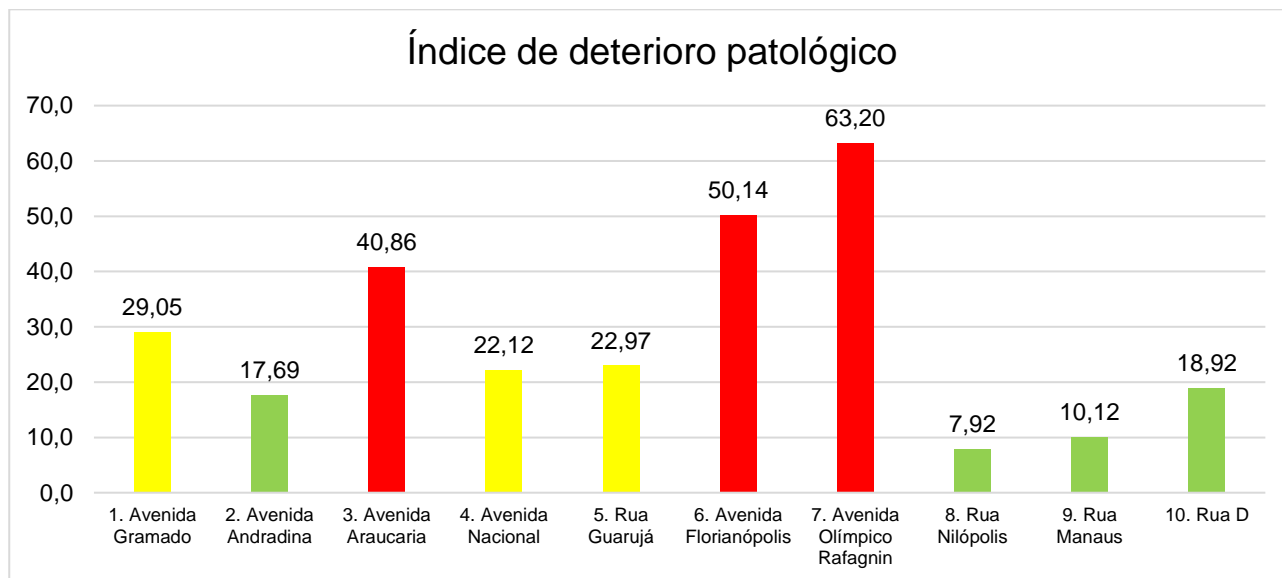
	Vías Urbanas	IDP	Nivel final
1	Avenida Gramado	29,05	Medio
2	Avenida Andradina	17,69	Bajo
3	Avenida Araucária	40,86	Alto
4	Avenida Nacional	22,12	Medio
5	Rua Guarujá	22,97	Medio
6	Avenida Florianópolis	50,14	Alto
7	Avenida Olímpico Rafagnin	63,20	Alto
8	Rua Nilópolis	7,92	Bajo
9	Rua Manaus	10,12	Bajo
10	Rua D	18,92	Bajo

Bajo	Medio	Alto
0 - 20	20 - 40	> 40

Fuente: Autora (2023).

A través del cálculo del índice de deterioro patológico utilizando la herramienta metodológica implementada se ha obtenido un resultado que permite identificar la condición actual de las vías urbanas.

Figura 37. Índice de deterioro patológico para el estudio de caso en la ciudad de Foz do Iguaçu.



Fuente: Autora (2023).

De acuerdo con los intervalos otorgados al nivel final de deterioro, se observa en la **Figura 37** que existen 3 vías que presentan un deterioro notable, siendo la Avenida Olímpico Rafagnin la que posee un peso mayor, consecuentemente la Avenida Florianópolis y luego la Avenida Araucária, clasificando así en el nivel “alto”. Esto indica que es necesaria una intervención urgente de mantenimiento o reparación de estas vías.

Luego, se observa que la Avenida Gramado, Avenida Nacional y la Rua Guarujá se encuentran en un nivel final de deterioro “medio”. Por lo tanto, se requiere una intervención de mantenimiento preventivo para evitar que estas vías no alcancen un nivel de deterioro alto. Además, se observa que el resto de las vías urbanas se encuentran un nivel “bajo” de deterioro final, lo que indica que no requieren de una intervención de mantenimiento urgente.

5.2. MAPAS DE CALOR

El uso de dispositivos electrónicos no tripulados auxilia en la inspección visual siendo un gran avance en la implementación de tecnología dentro del área de inspección de pavimentos. Estos dispositivos ofrecen resultados de alta calidad, lo que mejora los procedimientos de inspección y facilita la detección precoz de fallas en el pavimento, contribuyendo para la toma de decisiones.

Con las imágenes obtenidas del levantamiento fotográfico aéreo de 4 vías urbanas

de la ciudad de Foz do Iguaçu y el procesamiento realizado por el software QGis se logró generar mapas de calor de las vías urbanas utilizando la leyenda de la **Tabla 36** por medio de figuras, líneas y colores.

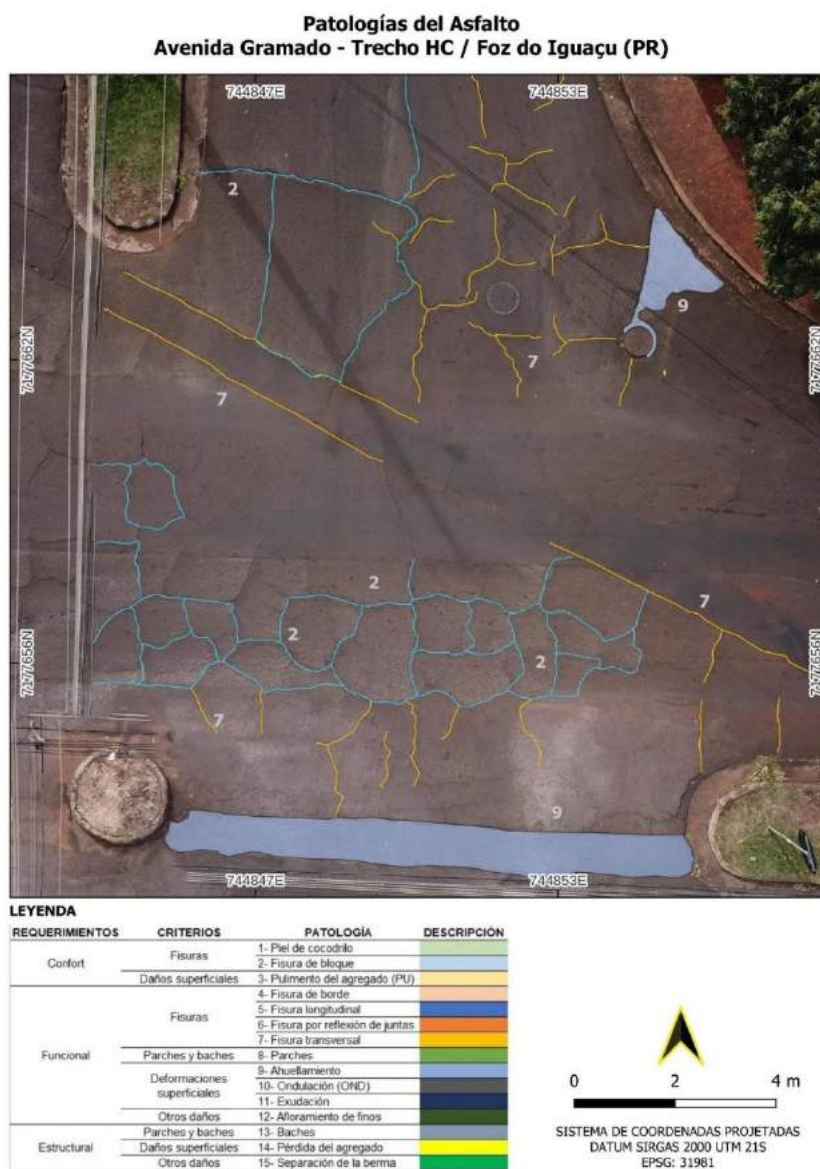
Los mapas de calor presentan de una forma clara y precisa las diferentes manifestaciones patológicas existentes en las vías inspeccionadas. Además, con la georreferencia en el SIRGAS 2000 es posible identificar la localización exacta de cada una de las manifestaciones patológicas que se encuentran en la superficie de la capa asfáltica.

5.2.1. Resultados obtenidos por levantamiento aéreo fotográfico

A partir de las fotografías previamente seleccionadas y presentadas en la sección **4.2.2. Uso de dispositivos electrónicos no tripulados** se realizó el procesamiento para obtener los mapas georreferenciados de las 4 vías urbanas levantadas con dron en la ciudad de Foz do Iguaçu.

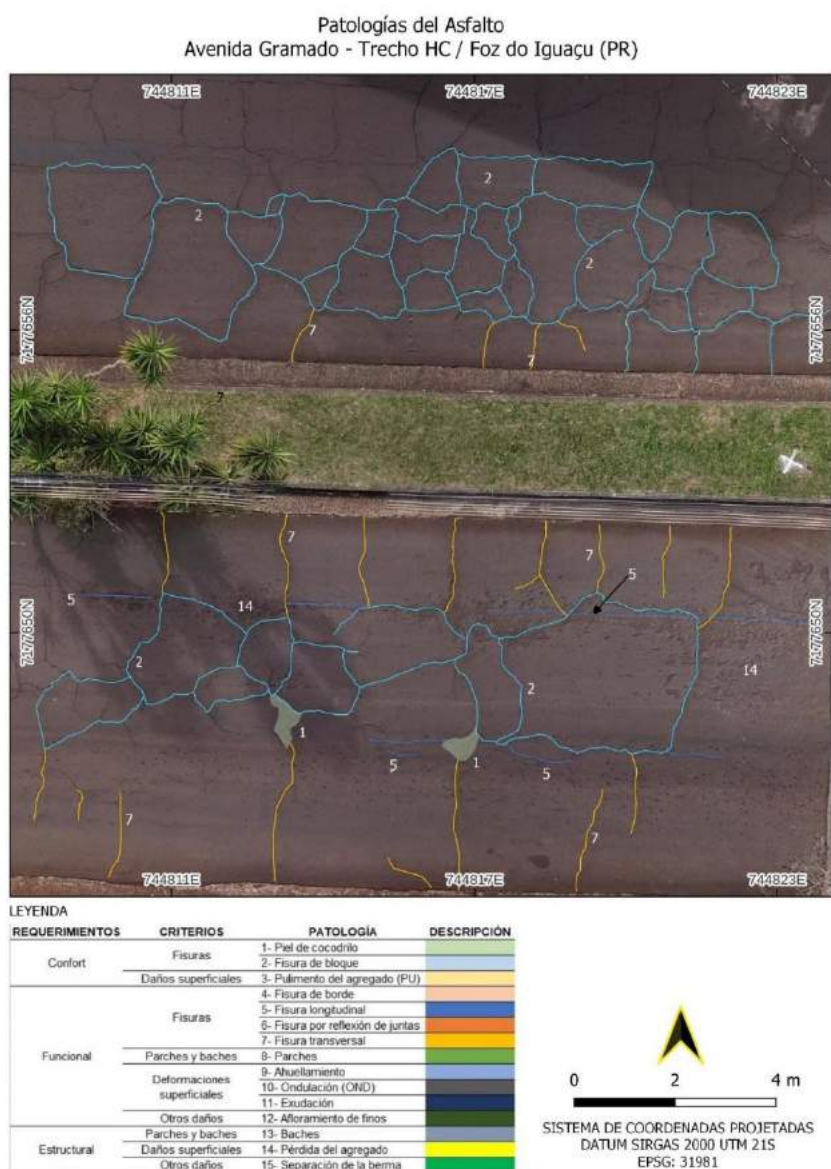
En la **Fotografía 10** y **Fotografía 11** se muestra el mapa georreferenciado de la Avenida Gramado, donde se tiene una visualización clara de las manifestaciones patológicas presentes en la superficie asfáltica. Es evidente que las fisuras transversales, longitudinales y de bloque son las más recurrentes en esta vía, otras manifestaciones patológicas como el ahuellamiento y la piel de cocodrilo también se encuentran presentes en menor medida.

Fotografía 10. Mapa georreferenciado de la Avenida Gramado.



Fuente: Autora (2023).

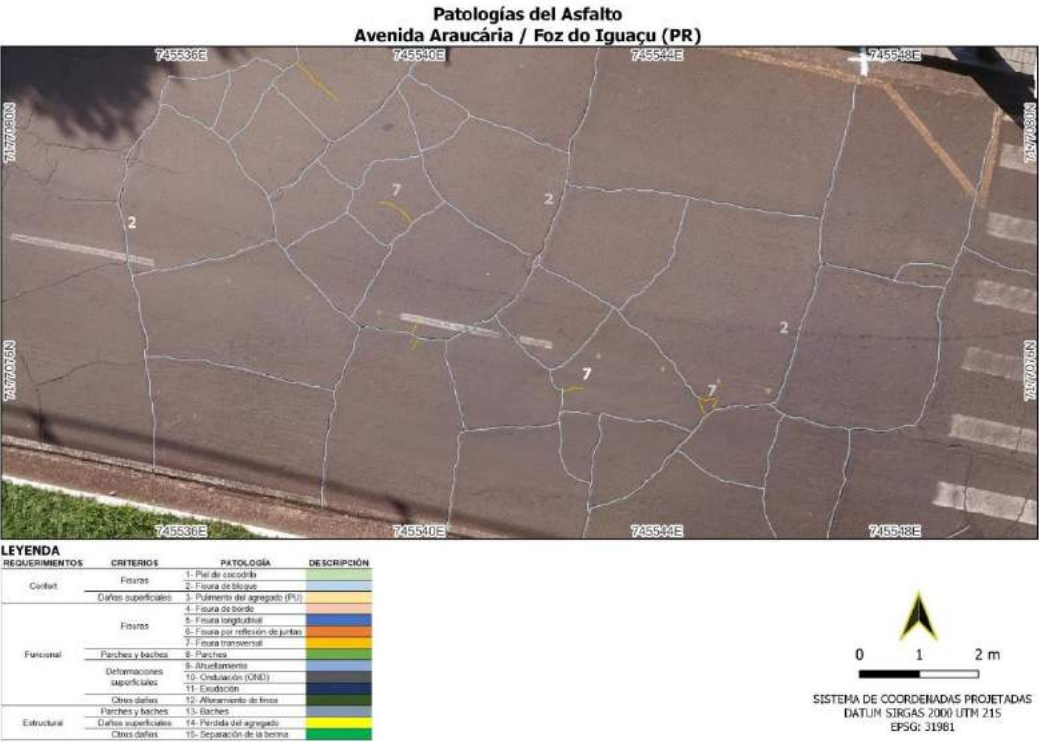
Fotografía 11. Mapa georreferenciado de la Avenida Gramado.



Fuente: Autora (2023).

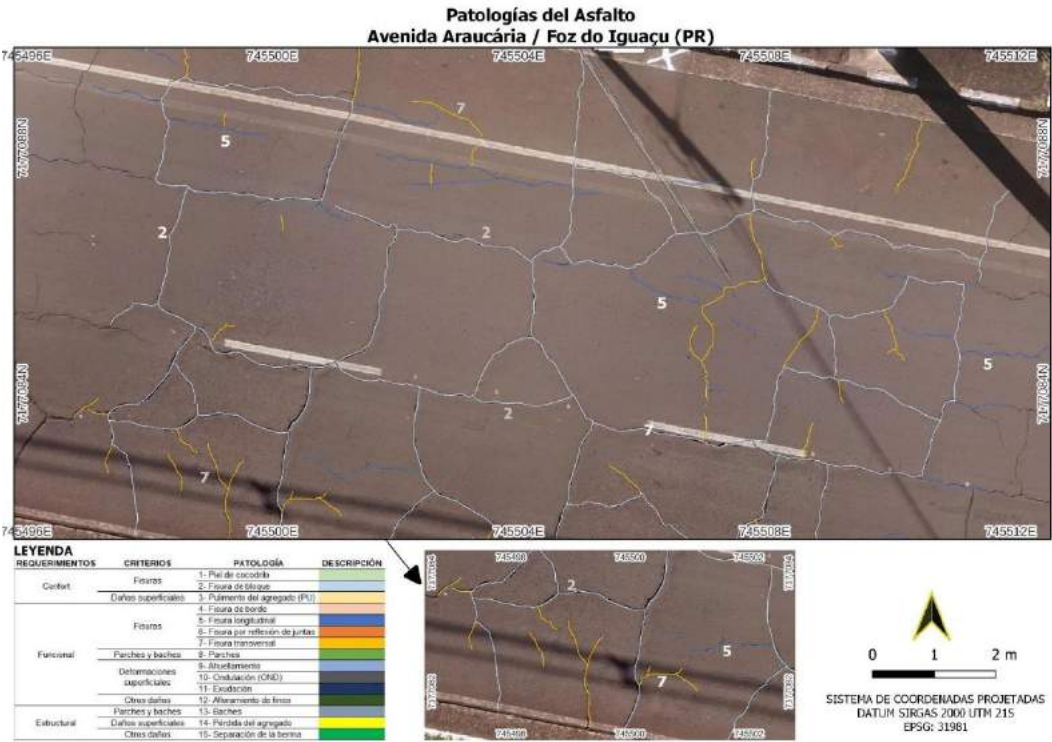
En la leyenda se observa la descripción y enumeran las distintas manifestaciones patológicas, lo que permite asignar a cada una un color y número específico dentro del mapa indicando así su ubicación exacta. En la **Fotografía 12** y **Fotografía 13** se observa que, en la mayor parte de la vía levantada, que corresponde a la Avenida Araucária, predominan las fisuras transversales, longitudinales y de bloque.

Fotografía 12. Mapa georreferenciado de la Avenida Araucária.



Fuente: Autora (2023).

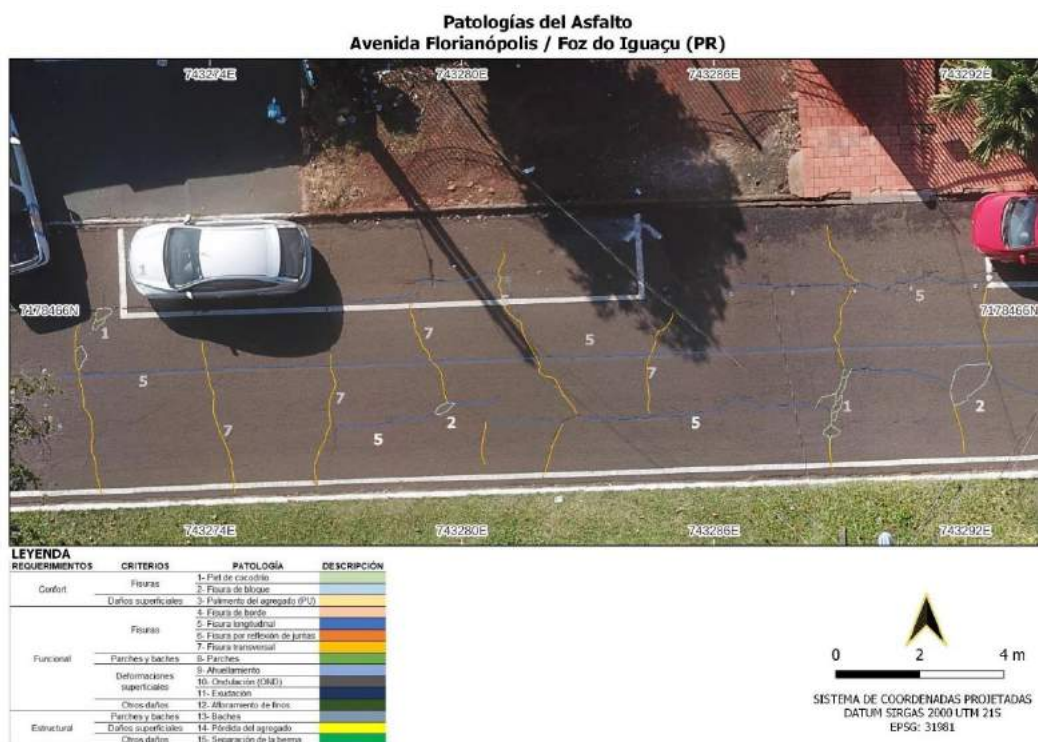
Fotografía 13. Mapa georreferenciado de la Avenida Araucária.



Fuente: Autora (2023).

En la **Fotografía 14** y **Fotografía 15**, es posible notar que en gran parte del tramo levantado se presentan fisuras transversales y longitudinales. Además, se observa la presencia de piel de cocodrilo y una considerable separación de la berma.

Fotografía 14. Mapa georreferenciado de la Avenida Florianópolis.



Fuente: Autora (2023).

Fotografía 15. Mapa georreferenciado de la Avenida Florianópolis.



Tabla 44. Cuantificación de indicadores en las vías urbanas por medio del levantamiento aéreo.

INDICADORES	VÍAS URBANAS			
	1	2	3	4
Piel de cocodrilo	15	0	30	65
Fisuración en bloques	90	125	65	0
Pulimento del agregado	0	0	0	0
Fisuración de borde	0	0	0	0
Fisuración Longitudinal	30	75	125	65
Fisuración por reflexión de juntas	0	0	0	0
Fisuración Transversal	30	65	130	30
Parches	0	0	0	40
Ahuellamiento	25	0	0	0
Ondulación	0	0	0	50
Exudación	0	0	0	0
Afloramiento de finos	0	0	0	0
Baches	40	0	0	0
Pérdida del agregado	25	0	0	150
Separación de la berma	0	0	75	75

Fuente: Autora (2023).

La utilización de imágenes aéreas procesadas y georreferenciados es una herramienta útil para la evaluación del estado en el que se encuentran las vías urbanas. La cuantificación de las manifestaciones patológicas proporciona una base sólida para analizar la influencia que poseen en el grado de deterioro y la urgencia de intervención, lo que la convierte en una herramienta útil para la gestión pública en el ámbito de mantenimiento y restauración de vías urbanas.

6 CONCLUSIONES

El objetivo general de este trabajo de conclusión de curso fue desarrollar un modelo multicriterio de inspección para la evaluación y medición de deformaciones superficiales en pavimentos flexibles que permita orientar actuaciones correctivas en la administración pública con relación al mantenimiento y reparación de la superficie asfáltica.

Tras analizar las distintas metodologías de levantamiento de las manifestaciones patológicas, se constató que el modelo multicriterio permite una evaluación precisa del estado actual del pavimento, lo que se ve reflejado en el índice de deterioro patológico obtenido como indicador de la urgencia de intervención o mantenimiento de una vía urbana.

En la creación del índice de deterioro patológico se recopiló información de estudios previos y se elaboró un esquema de agrupación de indicadores en criterios y en requerimientos con el fin de crear el árbol de requerimientos. Además, se identificaron los indicadores que representan las 15 manifestaciones patológicas analizadas en este trabajo para su estudio dentro del índice de deterioro patológico.

Con la aplicación de la metodología AHP (Analytic Hierarchy Process) se tuvo una asignación de pesos coherente para valorar de manera adecuada los indicadores estudiados, lo que permitió entablar una jerarquía de importancia entre los indicadores, y, por lo tanto, lograr una mejor comprensión acerca de la influencia que posee cada uno sobre la evaluación del pavimento.

Se validó la metodología de inspección y evaluación de pavimentos mediante la inspección visual realizada en 10 vías urbanas, y el uso de dispositivos electrónicos no tripulados para recopilar información de las manifestaciones patológicas en 4 vías urbanas en la ciudad de Foz do Iguaçu. La inclusión de drones en la inspección de pavimentos resultó sumamente beneficiosa, ya que permitió obtener una mejor visualización de la expansión de las manifestaciones patológicas y registrarlas con mayor precisión en la superficie asfáltica.

Se pudo constatar que la implementación de dispositivos electrónicos no tripulados es una alternativa viable y efectiva para la inspección y evaluación de la condición del pavimento en las vías urbanas. La combinación de esta tecnología con los sistemas de información geográfica permitió la generación de los mapas de calor, los cuales fueron georreferenciados para visualizar la localización exacta de las distintas manifestaciones patológicas encontradas en la superficie asfáltica.

Con las respuestas obtenidas en el caso de estudio realizado en 10 vías urbanas de

la ciudad de Foz do Iguaçu se evaluó el índice de deterioro patológico en términos de requerimientos: confort, funcional y estructural. Los resultados indican que la Avenida Florianópolis y la Avenida Olímpico Rafagnin fueron las más afectadas al tener un índice alto en términos de déficit de confort y funcionalidad, respectivamente, ambas vías también presentaron un índice mayor en el requerimiento estructural. Las demás vías resultaron en un nivel bajo y medio, lo que indica la posible necesidad de un mantenimiento preventivo para evitar alcanzar un nivel alto de deterioro.

Con base en los resultados obtenidos del índice de deterioro patológico se destaca que sí existe la necesidad de intervención de mantenimiento y reparación de algunas de las vías analizadas en este estudio, para garantizar la seguridad y comodidad de los usuarios. La identificación de las vías más afectadas en términos de confort, funcionalidad y estructural permite una toma de decisión al respecto de las acciones de mantenimiento a ser enfrentadas por la administración pública, lo que puede resultar en la optimización de costos en la gestión de la infraestructura urbana.

Este estudio es el resultado de la combinación de varias áreas de actuación, incluyendo herramientas metodológicas, criterios de análisis, herramientas tecnológicas, inspecciones visuales, levantamiento en campo, que contribuyen en las tomas de decisión. La aplicación del índice de deterioro patológico en futuras evaluaciones del estado del pavimento puede ofrecer informaciones útiles al acompañamiento del control de la condición del pavimento a lo largo del tiempo.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, H. et al. Practical Field Investigation to Indicate Common Flexible Pavement Distresses That Occur in The Malik Mahmood Ring Road-sulaimaniyah City. **The Journal of the University of Duhok**, v. 23, n. 2, p. 173–182, 2020.
- ALAAMRI, R. S. N.; KATTIPARUTHI, R. A.; KOYA, A. M. Evaluation of Flexible Pavement Failures-A Case Study on Izki Road. **International Journal of Advanced Engineering, Management and Science**, v. 3, n. 7, p. 741–749, 2017.
- ALBUQUERQUE, T. P. E. **ÍNDICE DE CONDIÇÃO BASEADO EM DEFEITOS SUPERFICIAIS PARA GERÊNCIA DE PAVIMENTOS URBANOS**. Dissertação de Mestrado—João Pessoa - Paraíba: Universidade Federal da Paraíba, 2017.
- ALVES, M. T. DE O.; FERNANDES, R. E. C.; BERTEQUINI, A. B. T. Patologias Em Pavimento Flexível. p. 1–15, 2018.
- AN, K. E. et al. Detecting a pothole using deep convolutional neural network models for an adaptive shock observing in a vehicle driving. **2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics, ICCE 2018**, p. 1–2, 2018.
- ARROYO, P. et al. A new method for applying choosing by advantages (CBA) multicriteria decision to a large number of design alternatives. **Energy and Buildings**, v. 167, p. 30–37, 2018.
- ASPEN, D. M.; HASKINS, C.; FET, A. M. Application of systems engineering to structuring acquisition decisions for marine emission reduction technologies. **Systems Engineering**, v. 21, n. 4, p. 388–397, jul. 2018.
- AZHAR, K. et al. Computer vision based detection and localization of potholes in asphalt pavement images. **Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering**, v. 2016- Octob, p. 1–5, 2016.
- BABASHAMSI, P. et al. Evaluation of pavement life cycle cost analysis: Review and analysis. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 9, n. 4, p. 241–254, 2016.
- BALADI, G. et al. Pavement Performance Measures and Forecasting and the Effects of Maintenance and Rehabilitation Strategy on Treatment Effectiveness (Revised). **FHWA-HRT-17-095**, p. 1–329, 2017.
- BALLESTEROS, R. D.; LORDSLEEM JUNIOR, A. C. Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) para inspeção de manifestações patológicas em fachadas com revestimento cerâmico. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 1, p. 119–137, 2021.
- BENITEZ, D. D. A.; INTRIAGO, E. L. R. Comparative analysis of the deformation and strength of asphalt mixture with volcanic toba and traditional asphalt mixture. **Ciencia y Educación**, v. 2, n. 4, p. 6–29, 2020.
- BHANDARI, S.; LUO, X.; WANG, F. Understanding the effects of structural factors and traffic loading on flexible pavement performance. **International Journal of**

Transportation Science and Technology, 2022.

BRANCO, L. H. C.; SEGANTINE, P. C. L. MaNIAC-UAV - A methodology for automatic pavement defects detection using images obtained by Unmanned Aerial Vehicles. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 633, n. 1, 2015.

CASTRO, H. A. et al. Inferências quanto à aplicação de pavimentação asfáltica na rodovia Inferências quanto à aplicação de pavimentação asfáltica na rodovia. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento.**, v. 9, p. 23–37, 2016.

CAVALCANTE, C. A. V.; ALENCAR, M. H.; LOPES, R. S. Multicriteria Model to Support Maintenance Planning in Residential Complexes under Warranty. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 143, n. 4, p. 1–9, abr. 2017.

CAVALET, V. N. et al. ANÁLISE COMPARATIVA DO CUSTO-BENEFÍCIO ENTRE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS EM CONCRETO ASFÁLTICO E PAVIMENTOS RÍGIDOS EM CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND APLICADO EM RODOVIA DE ALTO TRÁFEGO. **33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET**, 2019.

CHAWLA, V. K. **Automated Pavement Condition Assessment using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Convolutional Neural Network (CNN)**. Master of Science in Construction Management—[s.l.] East Carolina University, 2021.

CHIARELLO, G. P. et al. Avaliação estrutural e financeira de pavimento flexível dimensionado pelo Método do DNER (1981) e MEDINA (2019): estudo de caso da duplicação da BR 287 - trecho Santa Cruz do Sul à Tabaí/RS. **33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET**, p. 1234–1245, 2019.

CHUANG, T. Y.; PERNG, N. H.; HAN, J. Y. Pavement performance monitoring and anomaly recognition based on crowdsourcing spatiotemporal data. **Automation in Construction**, v. 106, n. February, p. 102882, 2019.

CNT. PESQUISA DE RODOVIAS CNT 2016. Condição Nacional do Transporte. v. 1, p. 399, 2016.

CNT. Por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram? **Confederação Nacional do Transporte**, p. 158, 2017.

CNT. Pesquisa CNT de rodovias 2022. **Confederação Nacional do Transporte**, p. 0–229, 2022.

COENEN, T. B. J.; GOLROO, A. A review on automated pavement distress detection methods. **Cogent Engineering**, v. 4, n. 1, 2017.

COTAZO, N. X. R. et al. Revisión de métodos para la clasificación de fallas superficiales en pavimentos flexibles. **Ciencia e Ingeniería Neogranadina**, v. 30, n. 2, p. 109–127, 2020.

CZRNHAK, A. C. DA S.; HUBER, N. L.; DUSI, L. Estudo De Patologias De Pavimentos Flexíveis Na Cidade De Caçador / Sc. **IGNIS: Periódico Científico de Arquitetura e Urbanismo, Engenharias e Tecnologia de Informação**, v. 8, n. 1, p. 83–95, 2019.

DABOUS, S. A. et al. Sustainability-informed multi-criteria decision support framework for ranking and prioritization of pavement sections. **Journal of Cleaner Production**, p. 118755, 2019.

DADRASJAVAN, F.; ZARRINPANJEH, N.; AMERI, A. Automatic Crack Detection of Road Pavement Based on Aerial UAV Imagery. n. July, p. 1–16, 2019.

DÁVILA, L. H. G.; NAVARRETE, J. A. R.; REA, M. D. L. L. P. Optimización de espesores de pavimento flexible. **Geotecnia. Órgano Oficial de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A. C.**, v. Núm. 248, 2018.

DE ALMEIDA, H. DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS NO BRASIL: COMPARATIVO ENTRE O MÉTODO DNER E MECANÍSTICO EMPIRICO - ME. **Instituto de Pós Graduação - IPOG**, p. 1–16, 2017.

DE AZEVEDO, R. E. B.; RIBAS, L. V. DA S.; DE OLIVEIRA, S. M. F. UTILIZAÇÃO DE METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DO PAVIMENTO FLEXÍVEL EM UMA VIA URBANA NA CIDADE DE CARUARU/PE. **34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET**, p. 1081–1090, 2020.

DE CARVALHO, L. M. C. et al. PATOLOGIAS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS EM CORREDORES DE ÔNIBUS - TRECHO DA AVENIDA JOÃO PESSOA, FORTALEZA-CE. 2016.

DE FIGUEIREDO, S. C. G.; RODRIGUES, F. DE A.; RIBAS, L. F. **Saberes da Engenharia: Uma contribuição para a sociedade**. Belo Horizonte-MG: Editora Poisson, 2022. v. 2

DE PAULA, M.; BARTELT, D. D. **MOBILIDADE URBANA NO BRASIL: DESAFIOS E ALTERNATIVAS**. Fundação H ed. Rio de Janeiro: [s.n.].

DÍEZ, J. L. M. **Priorización de proyectos de mejora para la movilidad urbana sostenible en la ciudad de Valencia**. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2015.

DNIT. MANUAL DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS. **Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias.**, p. 310, 2005.

DNIT. Manual de pavimentação. **Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias.**, 2006.

DNIT 005/2003 - TER. Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos Terminologia. **Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes**, p. 12, 2003.

DNIT 006/2003 - PRO. Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento. **Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes**, p. 10, 2003.

DNIT 007/2003 - PRO. Levantamento para avaliação da condição de superfície de

subtrecho homogêneo de rodovias de pavimentos flexíveis e semi-rígidos para gerência de pavimentos e estudos e projetos Procedimento. **Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes**, 2003.

DNIT 008/2003 - PRO. Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos Procedimento. **Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes**, n. Lvc, p. 11, 2003.

DNIT 009/2003 - PRO. Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento. **Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes**, p. 6, 2003.

FELIZARDO, L. M. Aplicação de Sistema de Informações Geográficas (SIG) para modelagem de eventos críticos de vazão em uma microbacia urbana. p. 1–98, 2016.

FERRI, S. et al. Proposição de metodologia para análise de risco em estruturas de pavimentos asfálticos flexíveis. **Transportes**, v. 25, n. 1, p. 93, 2017.

FHWA. DISTRESS IDENTIFICATION MANUAL for the Long-Term Pavemetrn Performance Program (LTPP). **US. DEPARTAMET OF TRANSPORTATION. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION**, n. May, p. 142, 2014.

GARCIA-BERNABEU, A. et al. Photovoltaic power plants: a multicriteria approach to investment decisions and a case study in western Spain. **Annals of Operations Research**, v. 245, n. 1–2, p. 163–175, 27 out. 2016.

GHADI, M. Q.; AHMAD, H.; JANNOUN, I. Influence of Traffic Characteristics on Pavement Performance of Parking Lots. **Infrastructures**, v. 8, n. 4, p. 65, 27 mar. 2023.

GHOS, S. et al. Evaluation of Transverse Cracking in Flexible Pavements Using Field Investigation and AASHTOWare Pavement ME Design. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 15, n. 3, p. 561–576, 2022.

GOMES, A. R. DE L. et al. Manifestações patológicas em pavimento flexível: estudo de caso - Rua Visconde de Porto Seguro. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 11, p. 72517–72528, 10 nov. 2022.

GONG, H. et al. Local calibration of the fatigue cracking models in the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide for Tennessee. **Road Materials and Pavement Design**, v. 18, n. 0, p. 130–138, 2017.

GUILHERME, D. D. P. et al. Avaliação Funcional Do Pavimento Flexível: Estudo De Caso - Trecho Da Rodovia Rn-016. **Impacto das tecnologias na Engenharia Civil**, 2018.

HADDAD, A. J.; CHEHAB, G. R.; SAAD, G. A. The use of deep neural networks for developing generic pavement rutting predictive models. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 0, n. 0, p. 1–17, 2021.

HADDADI, F. et al. Validation of a simplified method in viscoelastic continuum damage (VECD) model developed for flexural mode of loading. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 892–897, 2015.

HADIDI, T. et al. Utilizing Geographic Information System as a Tool for Pavement Management System. **International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers**, v. 4, p. 96–100, 2016.

HADJIDEMETRIOU, G. M.; CHRISTODOULOU, S. E.; VELA, P. A. **Automated detection of pavement patches utilizing support vector machine classification**. 2016 18th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON). **Anais...IEEE**, abr. 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7495460/>>

HEINRICH, C. E. et al. UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO (AHP) PARA ANÁLISE DAS ESTRADAS RURAIS DO MUNICÍPIO DE MARECHAL CÂNDIDO RONDON – PR. **DRd - Desenvolvimento Regional em Debate.**, v. 11, p. 182–203, 2021.

HERRERA, R. G. et al. DRONES. APLICACIONES EN INGENIERÍA CIVIL Y GEOCIENCIAS. v. 44, n. June, p. 326–332, 2019.

HERRERA SUAREZ, G.; CHAHUARES PAUCAR, L. Evaluación del deterioro del pavimento asfáltico en el tramo Ramal de Aspuzana-Nuevo Progreso mediante la metodología VIZIR en el año 2021. **Campus**, v. 26, n. 32, p. 239–256, 2021.

HO, C. H.; LAI, C. P.; ALMONNIEAY, A. Using geographic information systems and smartphone-based vibration data to support decision making on pavement rehabilitation. **Communications in Computer and Information Science**, v. 610, n. 2, p. 475–485, 2016.

HOANG, N. D. Image processing based automatic recognition of asphalt pavement patch using a metaheuristic optimized machine learning approach. **Advanced Engineering Informatics**, v. 40, n. January, p. 110–120, 2019.

HSIEH, Y. A.; TSAI, Y. Automated asphalt pavement raveling detection and classification using convolutional neural network and macrotexture analysis. **Transportation Research Record**, v. 2675, n. 9, p. 984–994, 2021.

INVIAS. Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles. **Instituto Nacional de Vías**, p. 70, 2006.

IRREÑO, C. A. B.; AGUILAR, E. D. APLICACIÓN PRÁCTICA DEL PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO (AHP), PARA LA TOMA DE DECISIONES. **Revista Ingeniería, Matemáticas y Ciencias de la Información**, v. 5, n. 9, p. 91–100, 2018.

JAKIMAVICIUS, M.; BURINSKIENE, M.; GUSARUVIENE, M. **A Multiple Criteria Evaluation of a New Streets Development Projects in Vilnius City**. Proceedings of 10th International Conference “Environmental Engineering”. **Anais...VGTU Technika**, 10 ago. 2017. Disponível em: <<http://enviro.vgtu.lt/index.php/enviro/2017/paper/view/24>>

JOIA, P. R.; PAIXÃO, A. A. Rodovias municipais: integração e organização do espaço no município de Aquidauana-MS. **Terra Plural**, v. 10, n. 1, p. 105–120, 2016.

KAPELA, R. et al. Asphalt surfaced pavement cracks detection based on histograms of oriented gradients. **Proceedings of the 22nd International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, MIXDES 2015**, p. 579–584, 2015.

- KARLAFTIS, A. G.; BADR, A. Predicting asphalt pavement crack initiation following rehabilitation treatments. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 55, p. 510–517, 2015.
- KETEMA, Y.; QUEZON, E. T.; KEBEDE, G. Cost and Benefit Analysis of Rigid and Pavement: Case Study in Chancho-Derba-Becho Road Project. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 7, n. 10, p. 181–188, 2016.
- KILIĆ PAMUKOVIĆ, J. et al. A Sustainable Approach for the Maintenance of Asphalt Pavement Construction. **Sustainability**, v. 13, n. 1, p. 18, 2020.
- LANZARO, G. A.; ANDRADE, M. A fuzzy multicriteria method for ranking the factors that influence the settlement of Brazilian highway speed limits. **Associação Nacional de Pesquisa e ensino em Transportes**, v. 28, n. 3, p. 212–227, 2020.
- LÁZARO, B. DE O. et al. Avaliação das condições de superfície de pavimentos urbanos com o auxílio de ferramentas de análise espacial. **Transportes**, v. 30, n. 1, p. 2539, 2022.
- LEIVA, F. et al. Permanent deformation model for pavement condition assessment. **Revista Ingenieria de Construcción**, v. 32, n. 1, p. 37–46, 2017.
- LESSA, D. A.; LOBO, C.; CARDOSO, L. Accessibility and urban mobility by bus in Belo Horizonte/Minas Gerais – Brazil. **Journal of Transport Geography**, v. 77, n. May 2018, p. 1–10, 2019.
- LI, W. et al. Research and application of heat map system for resource allocation of flood control based on GIS. **ITM Web of Conferences**, v. 17, p. 03001, 2018.
- LIANG, J. et al. A novel pavement mean texture depth evaluation strategy based on three-dimensional pavement data filtered by a new filtering approach. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 166, p. 108265, 2020.
- LIMA, A. S. et al. A consensus-based multicriteria group decision model for information technology management committees. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 65, n. 2, p. 276–292, maio 2018.
- MACHADO, T. F. DE O.; MARQUES, G. L. D. O.; ROCHA, M. L. Projeto de reforço para o pavimento flexível do anel viário da UFJF baseado no novo método de dimensionamento mecanístico-empírico nacional. **Transportes**, v. 28, n. 1, p. 202–214, 2020.
- MANSOURMOGHADDAM, M. et al. The Separation of the Unpaved Roads and Prioritization of Paving These Roads Using UAV Images. **Air, Soil and Water Research**, v. 15, 2022.
- MASSAHI, A. et al. Investigation of pavement raveling performance using smartphone. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 11, n. 6, p. 553–563, 2018.
- MEHDI, M. A. et al. Applying Geographic Information Systems (GIS) for surface condition indicators modeling of a flexible pavement. **E3S Web of Conferences**, v. 298, p. 04001, 5 ago. 2021.

MENDES, A. T. Levantamento Visual De Patologias Em Pavimentos Flexíveis De Vias Urbanas Em Araguaína – To. 2019.

MEZA, M. I. Z.; PIUSSEAUT, E. T. Materiales granulares tratados con emulsión asfáltica para su empleo en bases o subbases de pavimentos flexibles. **Revista de Arquitectura e Ingeniería**, v. 13, n. 3, p. 14, 2019.

MILAD, A. et al. Selecting the Affected Factors on Pavement Distress Problems Using Analytical Hierarchy Process [AHP]. **International Journal of Engineering & Technology**, v. 7, n. 2.29, p. 716, 2018.

MOHOD, M. V; KADAM, K. N. A Comparative Study on Rigid and Flexible Pavement: A Review. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)**, v. 13, n. 3, p. 84–88, 2018.

MOLIN, M. et al. Modelagem Computacional no Estudo de Deformações em Pavimentos Flexíveis. **Revista Cereus**, v. 10, n. 2, p. 170–179, 2018.

MONTIEL, C. M. D. L. P.; ORTEGA, A. A.; SARMIENTO, L. G. Autoevaluación institucional en los sistemas de educación superior, un análisis a partir de la aplicación de instrumentos híbridos AHP y TOPSIS. v. 3, 2018.

MOPC. Manual de Carreteras del Paraguay. **Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones**, v. 1er ed., 2011.

MOURA, F.; CAMBRA, P.; GONÇALVES, A. B. Measuring walkability for distinct pedestrian groups with a participatory assessment method : A case study in Lisbon. **Landscape and Urban Planning**, v. 157, p. 282–296, 2017.

NANTES, E. A. El Método Analytic Hierarchy Process Para La Toma De Decisiones: Repaso de la Metodología y Aplicaciones. **Investigación Operativa**, p. 54–73, 2019.

NAVEEN, N.; YADAV, S. M.; KUMAR, A. S. A Study on Potholes and Its Effects on Vehicular Traffic. **International Journal of Creative Research Thoughts**, v. 6, n. 1, p. 2320–2882, 2018.

NEGA, A. et al. Distress Identification, Cost Analysis and Pavement Temperature Prediction for the Long-Term Pavement Performance for Western Australia. **International Journal of Engineering and Technology**, v. 7, n. 4, p. 267–275, 2015.

NETO, P. DE S. L. et al. Verificação da influência de altitudes em levantamento de defeitos em pavimentos rodoviários com auxílio de VANT. n. April, 2019.

OLABANJI, O. M.; MPOFU, K. Adopting hybridized multicriteria decision model as a decision tool in engineering design. **Journal of Engineering, Design and Technology**, v. 18, n. 2, p. 451–479, 2020.

OLIVEIRA, A. R. D. S.; SALOMÃO, M. A.; BARBOSA, M. T. Análise da Qualidade da Mobilidade e Acessibilidade Urbana do Transporte Coletivo na Cidade de Juiz de Fora - MG. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. June, p. 1447–1462, 2022.

ORELLANA, C. A. S.; PROZZI, J. A.; HONG, F. MÉTODOS ESTADÍSTICOS PARA

CONTROL DE CALIDAD: VERIFICACIÓN DE MEDIDAS AUTOMATIZADAS DE AHUELLAMIENTO. **XX CILA. Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto.**, 2019.

ORTIZ-CARRILLO, Á. A. et al. Revisión De Las Tendencias Innovadoras En La Estructuración De Pavimentos Como Parte Del Desarrollo Sustentable. **Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability**, v. 2, n. 1, p. 55–76, 2018.

PAN, Y. et al. Monitoring Asphalt Pavement Aging and Damage Conditions from Low-Altitude UAV Imagery Based on a CNN Approach. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 47, n. 3, p. 432–449, 2021.

PARENTE, D. C.; FELIX, N. C.; PICANÇO, A. P. Utilização de veículo aéreo não tripulado (VANT) na identificação de patologia superficial em pavimento asfáltico. **Revista ALCONPAT**, v. 7, n. 2, p. 160–171, 2017.

PEÑA SOTOMAYOR, M. P.; ZÁRATE TORRES, B. A. Empleo de VANT para determinar fallas superficiales en pavimentos flexibles. **Avances Investigación en Ingeniería**, v. 17, n. 2, p. 1–9, 2020.

PEREIRA, L. A.; SILVA JÚNIOR, C. A. P.; FONTENELE, H. B. Escala visual para evaluación de pavimentos urbanos: Una validación en oficina. **Revista Ingeniería de Construcción**, v. 34, n. 1, p. 45–54, 2019.

PÉREZ-ACEBO, H. et al. IRI performance models for flexible pavements in two-lane roads until first maintenance and/or rehabilitation work. **Coatings**, v. 10, n. 2, 2020.

PESCADOR JUNIOR, A. C.; DA SILVA JUNIOR, C. A. P.; FONTENELE, H. B. Comparação de métodos de avaliação da condição de pavimentos flexíveis com o auxílio de um Sig-T. **Revista CIATEC-UPF**, v. 10, n. 1, p. 95–103, 2018.

PINHEIRO, A. V. S.; SILVA, M. F. DE S.; SALOMÃO, P. E. Análise de Patologias no Pavimento Flexível da BR116 Trecho Sudeste: Teófilo Otoni-Itambacuri (Minas Gerais/Brasil). **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, v. 1, p. 1–33, 2021.

RANJBAR, S.; NEJAD, F. M.; ZAKERI, H. An image-based system for asphalt pavement bleeding inspection. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 23, n. 12, p. 4080–4096, 2022.

RANYAL, E.; SADHU, A.; JAIN, K. Road Condition Monitoring Using Smart Sensing and Artificial Intelligence: A Review. **Sensors**, v. 22, n. 8, p. 1–27, 2022.

RIBEIRO, A. J. A.; BEZERRA, F. R. D.; NETO PINHEIRO, J. C. Metodologia Prática de Avaliação de Patologias no Pavimento Asfáltico em Avenida de Fortaleza/CE. **Conexões - Ciência e Tecnologia**, v. 11, n. 6, p. 91, 2017.

ROBERTS, R.; INZERILLO, L.; DI MINO, G. Using uav based 3d modelling to provide smart monitoring of road pavement conditions. **Information (Switzerland)**, v. 11, n. 12, p. 1–24, 2020.

RUIZ- PADILLO, A. et al. Application of multi-criteria decision analysis methods for assessing walkability : A case study in Porto Alegre, Brazil. **Transportation Research Part D**, v. 63, p. 855–871, 2018.

RUIZ-PADILLO, A. et al. Análisis comparativo de la seguridad vial en carriles bici mediante la técnica AHP. **xx Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito, Transporte y Logística - PANAM 2018**, p. 523–536, 2018.

SAATY, T. L. Decision making — the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP). **Journal of Systems Science and Systems Engineering**, v. 13, n. 1, p. 1–35, 2004.

SALVIATTO, V. H.; FONTENELE, H. B. Index for assessing the condition of flexible urban pavements based on a constructivist multicriteria analysis. **Revista Ingenieria de Construccion**, v. 36, n. 2, p. 107–116, 2021.

SCHNEBELE, E.; TANYU, B. F.; WATERS, N. Review of remote sensing methodologies for pavement management and assessment. **Eur. Transp. Res. Rev.**, 2015.

SEGRE, T. S. P. Pavimentos Flexíveis : Análise Dos Defeitos Em Função Da Sua Origem E Suas Consequências Na. **GEOCENTRO**, 2019.

SHAIKH, S. G. et al. Scientific Study of Asphalt Road Surface Distress and their Role in the Design of Flexible Pavements. **International Journal of Engineering Trends and Technology**, v. 70, n. 1, p. 220–232, 2022.

SHON, H.; LEE, J. Integrating multi-scale inspection, maintenance, rehabilitation, and reconstruction decisions into system-level pavement management systems. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 131, n. June, p. 103328, 2021.

SILVA-BALAGUERA, A.; LEGUIZAMÓN, O. D.; VALIENTE, L. L. Gestión de pavimentos basado en Sistemas de Información geográfica (SIG): una revisión. **Ingeniería Solidaria**, v. 14, n. 26, 2018.

SILVA, H. T. DA et al. Study of pathologies on flexible floors in the city of Teófilo Otoni, Minas Gerais State, Brazil. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, p. e59710716928, 2 jul. 2021.

SILVA, L. A. et al. An Architectural Multi-Agent System for a Pavement Monitoring System with Pothole Recognition in UAV Images. **Sensors**, v. 20, n. 6025, p. 23, 2020.

SILVA, L. S. et al. Análise comparativa entre as técnicas construtivas de pavimentação empregadas no sistema Bus Rapid Transit (BRT) - Belém - PA versus Fortaleza - CE. **RCT - Revista de Ciência e Tecnologia**, v. 4, n. 6, 2018.

SOUTO, E. V.; MORESCO, B. H.; GOLTZ, C. J. Patologias em pavimentos asfálticos: estudo de caso na rua dr. renato figueiro varella em nova xavantina –MT. **Revista Interação Interdisciplinar**, v. 3, N° 2, p. 117–130, 2019.

TAMRAKAR, N. K. Overview on causes of flexible pavement distresses. **Bulletin of Nepal Geological Society**, v. 36, 2019.

THENOUX, G.; GARNICA, P. Estudio de la condición funcional y diagnóstico condición estructural de pavimentos a nivel de proyecto : Parte 1. v. 1, p. 1518–1526, 2019.

TONDELO, P. G.; BARTH, F. Análise das manifestações patológicas em fachadas por meio de inspeção com VANT. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 10, p. e019009, 26 fev. 2019.

TORIBIO, J. O. C.; LAZARES, J. W. G. Evaluación Superficial de Vías Urbanas empleando Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT). **Métodos y Materiales**, v. 8, p. 23–32, 2019.

TORRES-MACHI, C. et al. Sustainability Evaluation of Pavement Technologies through Multicriteria Decision Techniques. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 25, n. 3, p. 1–10, 2019.

TRY, S. et al. Virtual reality application to aid civil engineering laboratory course: A multicriteria comparative study. **Computer Applications in Engineering Education**, v. 29, n. 6, p. 1771–1792, 18 nov. 2021.

VALAREZO, P. A. E. **Desarrollo de una herramienta de toma de decisiones para la gestión del mantenimiento de pavimentos bajo criterios de sostenibilidad. Aplicación a la red vial urbana de la ciudad de Valencia**. Trabajo final de Máster—Valencia: Universitat Politècnica de València, 2018.

VALE, A. C. DO; PAIS, J. C. AVALIAÇÃO DAS TENSÕES ATUANTES NA SUPERFÍCIE DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS CAUSADOS POR CARREGAMENTO PESADO Aline Colares do Vale Jorge Carvalho Pais. **XXXI Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET**, 2017.

VALERA, J. M. **Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias**. Tesis Doctoral—Valencia: UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA, 2015.

VERDUZCO, V.; GARATUZA, J.; DÍAZ, S. Priorización de necesidades de reemplazo de tuberías usando SIG y evaluación multicriterio. **Tecnología y ciencias del agua**, v. VI, n. 1, p. 99–120, 2015.

VIEIRA, S. A. et al. Análise Comparativa De Metodologias De Avaliação De Pavimentos Através Do Igg E Pci. **Conexões - Ciência e Tecnologia**, v. 10, n. 3, p. 20–30, 2016.

VILLEGAS, N. **Análisis de valor en la toma de decisiones aplicado a carreteras**. Tesis Doctoral—Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2009.

VUILLET, M. et al. Developing a Probabilistic Multicriteria Method for River Levee Performance Evaluation in Support of Diagnostic Analysis. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 22, n. 3, p. 1–9, 2016.

WADA, S. A. Bituminous Pavement Failures. **Journal of Engineering Research and Applications** www.ijera.com, v. 6, n. 2, p. 94–100, 2016.

WANG, H. et al. Development of two-dimensional micromechanical, viscoelastic, and heterogeneous-based models for the study of block cracking in asphalt pavements. **Construction and Building Materials**, v. 244, p. 118146, 2020.

ZEYBEK, M.; BIÇICI, S. Road Distress Measurements Using UAV. **Turkish Journal of Remote Sensing and GIS**, v. 1, n. 1, p. 13–23, 2020.

ZHANG, L. et al. Study on Pavement Defect Detection Based on Image Processing Utilizing UAV. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1168, n. 4, 2019.

ZHANG, Y. et al. A kinect-based approach for 3D pavement surface reconstruction and cracking recognition. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 19, n. 12, p. 3935–3946, 2018.

ZUMRAWI, M. M. E. Survey and Evaluation of flexible Pavement Failures. **International Journal of Science and Research (IJSR) ISSN**, v. 4, n. 1, p. 1602–1607, 2020.

8 ANEXOS

Ficha de levantamiento de datos

Manifestaciones patológicas del asfalto

Responsable: Nombre Apellido

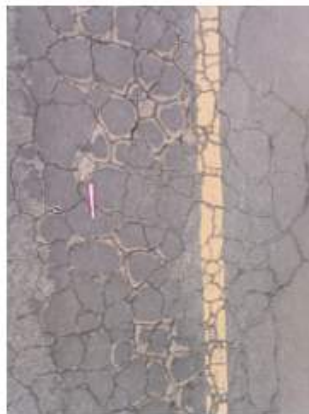
Informe la dirección: Dirección de la calle

Distancia analizada: km.

Hora inicio Hora AM▼

Fecha: Fecha

Piel de cocodrilo



Parámetros

- ☐ Principio de fisuras sin unión
- ☐ Aparición de fisuras unidas
- ☐ Fisuras selladas y baja profundidad
- ☐ Fisuras abiertas y profundas
- ☐ Evaluación de fisuras formando estructura de grietas
- ☐ Señales evidentes de bombeo
- ☐ Indicio de depresiones en el pavimento

Dimensiones en metros

Largo Ancho Profundidad

Observaciones Escribir una etiqueta

Valoración (Piel de cocodrilo)

0

Fisuración en bloques



Patrones de 0,10 a 0,30 m. Con abertura

- ☐ ≤ 6 mm o fisuras cerradas.
- ☐ > 6 mm y ≤ 19 mm
- ☐ > 19 mm

Patrones de 0,30 a 0,60 m. Con abertura

- ☐ ≤ 6 mm o fisuras cerradas.
- ☐ > 6 mm y ≤ 19 mm
- ☐ > 19 mm

Patrones mayor que 0,60 m. Con abertura

- ☐ ≤ 6 mm o fisuras cerradas.
- ☐ > 6 mm y ≤ 19 mm
- ☐ > 19 mm

Dimensiones en metros

Largo Observaciones [Escribir una etiqueta](#)

Valoración (Fisuración en bloques)

Pulimento del agregado



Agregados

- ☐ Suave al tacto, agregados insignificantes
- ☐ Moderado, agregados pequeños
- ☐ Moderado, agregados grandes
- ☐ Rugoso, agregados angulares

Dimensiones en metros

Largo

Ancho

Observaciones [Escribir una etiqueta](#)

Valoración (Pulimento del agregado)

Fisuración de borde



Parámetros

- ☐ Fisuras incipientes
- ☐ Fisuras propagadas

Erosión del pavimento

- ☐ 0 - 10%
- ☐ 10 - 50%
- ☐ > 50%

Dimensiones en metros

Largo

Observaciones [Escribir una etiqueta](#)

Valoración (Fisuración de borde)

Fisuración longitudinal

Patrones de 0,10 a 0,30 m². Con abertura

- ☐ ≤ 6 mm o fisuras cerradas.
- ☐ > 6 mm y ≤ 19 mm
- ☐ > 19 mm

Patrones de 0,30 a 0,60 m². Con abertura

- ☐ ≤ 6 mm o fisuras cerradas.
- ☐ > 6 mm y ≤ 19 mm
- ☐ > 19 mm

Patrones mayor que 0,60 m². Con abertura

- ☐ ≤ 6 mm o fisuras cerradas.
- ☐ > 6 mm y ≤ 19 mm
- ☐ > 19 mm

Dimensiones en metros

Largo Observaciones [Escribir una etiqueta](#)

Valoración (Fisuración Longitudinal)

Fisuración por reflexion de juntas



Patrones de 0,10 a 0,30 m². Con abertura

- ☐ ≤ 6 mm o fisuras cerradas.
- ☐ > 6 mm y ≤ 19 mm
- ☐ > 19 mm

Patrones de 0,30 a 0,60 m². Con abertura

- ☐ ≤ 6 mm o fisuras cerradas.
- ☐ > 6 mm y ≤ 19 mm
- ☐ > 19 mm

Patrones mayor que 0,60 m². Con abertura

- ☐ ≤ 6 mm o fisuras cerradas.
- ☐ > 6 mm y ≤ 19 mm
- ☐ > 19 mm

Dimensiones en metros

Largo Observaciones [Escribir una etiqueta](#)

Fisuración transversal



Patrones de 0,10 a 0,30 m². Con abertura

- ☐ ≤ 6 mm o fisuras cerradas.
- ☐ > 6 mm y ≤ 19 mm
- ☐ > 19 mm

Patrones de 0,30 a 0,60 m². Con abertura

- ☐ ≤ 6 mm o fisuras cerradas.
- ☐ > 6 mm y ≤ 19 mm
- ☐ > 19 mm

Patrones mayor que 0,60 m². Con abertura

- ☐ ≤ 6 mm o fisuras cerradas.
- ☐ > 6 mm y ≤ 19 mm
- ☐ > 19 mm

Dimensiones en metros

Largo Observaciones [Escribir una etiqueta](#)

Valoración (Fisuración Transversal)

Parches

Amplitud de patrones 0,1 m². Con profundidad

- ☐ ≤ 6mm. No se evidencia bombeo y no existe pérdida del material.
- ☐ > 6 mm y ≤ 12 mm. No se evidencia bombeo.
- ☐ > 12 mm. Evidencia de bombeo

Amplitud de patrones superior a 0,1 m². Con profundidad

- ☐ ≤ 6mm. No se evidencia bombeo y no existe pérdida del material.
- ☐ > 6 mm y ≤ 12 mm. No se evidencia bombeo.
- ☐ > 12 mm. Evidencia de bombeo

Dimensiones en metros

Largo Ancho Profundidad

Ahuellamiento



Deformación plástica con profundidad

- ☐ < 10 mm
- ☐ > 10 mm y ≤ 25 mm
- ☐ > 25 mm

Dimensiones en metros

Largo Ancho Observaciones

Valoración (Ahuellamiento)

Ondulación



Patrones con profundidad $\leq 0,10$ mm

- ☐ Conducción suave y cómoda.
- ☐ Conducción vibrante e incómoda.

Patrones con profundidad $> 0,10$ mm y ≤ 20 mm

- ☐ Conducción vibrante e incómoda.
- ☐ Conducción excesivamente vibrante y altamente incómoda.

Patrones con profundidad > 20 mm

- ☐ Conducción excesivamente vibrante y altamente incómoda.

Dimensiones en metros

Largo

Ancho

Profundidad

Observaciones

Valoración (Ondulación)

Exudación



Parámetros

- ☐ Patrones ≤ 5 m². Exudación visible en delgadas y finas líneas, sin cubrir los agregados.
- ☐ Patrones > 5 m² y ≤ 10 m². Exceso de asfalto sin ligar parcialmente, cubriendo los agregados.
- ☐ Patrones > 10 m². Abundante cantidad de asfalto pegajoso que cubre totalmente los agregados

Dimensiones en metros

Largo

Ancho

Observaciones

Valoración (Exudación)

Afloramiento de finos



Afloramiento de finos (m)

- ☐ Material fino en la superficie
- ☐ Piel de cocodrilo
- ☐ Descascaramientos

Dimensiones en metros

Largo Ancho Observaciones

Valoración (Afloramiento de finos)

Baches

Baches (m²)

- ☐ Patrones ≤ 25 m. Dimension linear de 150 mm.
- ☐ Patrones ≤ 25 m. Desprendimiento superficial, capas delgadas.
- ☐ Patrones > 25 mm y ≤ 50 mm. Exposición de la base.
- ☐ Patrones > 25 mm y ≤ 50 mm. Exposición de la base granular.
- ☐ Patrones > 50 mm. Exposición de la base granular.

Dimensiones en metros

Largo Ancho Observaciones

Valoración (Baches)

Pérdida del agregado



Pérdida del agregado (m)

- ☐ Los agregados gruesos han comenzado a separarse y hay pequeños huecos con una separación mayor a 0,15 m
- ☐ Existe una mayor separación de agregados con distancias entre 0,05m y 0,15 m
- ☐ Existe una separación extensiva de agregados finos y gruesos con separaciones menores a 0,05m, lo que hace que la superficie sea muy áspera y se ven agregados sueltos.

Dimensiones en metros

Largo

Observaciones

Escribir una etiqueta

Valoración (Pérdida del agregado)

Separación de la Berma



Separación de la Berma (s/u)

- ☐ Movimiento de la Berma ≤ 3 mm
- ☐ Movimiento de la Berma > 3 mm y ≤ 10 mm
- ☐ Movimiento de la Berma > 10 mm

Dimensiones en metros

Largo

Observaciones

Escribir una etiqueta

Valoración (Separación de la berma)

Tabla 45. Valoración y nivel de severidad del estudio de caso en la ciudad de Foz do Iguaçu.

INDICADORES	VÍAS URBANAS									
	1		2		3		4		5	
	Peso	Nivel	Peso	Nivel	Peso	Nivel	Peso	Nivel	Peso	Nivel
Piel de cocodrilo	15	Bajo	40	Medio	40	Medio	55	Medio	100	Alto
Fisuración en bloques	130	Alto	105	Alto	125	Alto	45	Alto	45	Alto
Pulimento del agregado	15	Bajo	15	Bajo	10	Bajo	25	Medio	0	Bajo
Fisuración de borde	0	Bajo	50	Alto	0	Bajo	0	Bajo	55	Alto
Fisuración Longitudinal	0	Bajo	85	Alto	0	Bajo	50	Alto	65	Alto
Fisuración por reflexión de juntas	0	Bajo	0	Bajo	0	Bajo	0	Bajo	0	Bajo
Fisuración Transversal	30	Medio	65	Alto	60	Alto	75	Alto	10	Bajo
Parches	45	Alto	0	Bajo	90	Alto	15	Bajo	135	Alto
Ahuellamiento	0	Bajo	0	Bajo	0	Bajo	0	Bajo	0	Bajo
Ondulación	0	Bajo	0	Bajo	0	Bajo	50	Alto	35	Medio
Exudación	25	Bajo	25	Bajo	25	Bajo	0	Bajo	0	Bajo
Afloramiento de finos	25	Bajo	25	Bajo	0	Bajo	0	Bajo	0	Bajo
Baches	40	Alto	0	Bajo	20	Medio	0	Bajo	5	Bajo
Pérdida del agregado	25	Bajo	25	Bajo	150	Alto	100	Alto	0	Bajo
Separación de la berma	0	Bajo	0	Bajo	0	Bajo	0	Bajo	0	Bajo

INDICADORES	VÍAS URBANAS									
	6		7		8		9		10	
	Peso	Nivel	Peso	Nivel	Peso	Nivel	Peso	Nivel	Peso	Nivel
Piel de cocodrilo	85	Medio	100	Alto	50	Medio	50	Medio	55	Medio
Fisuración en bloques	180	Alto	25	Medio	0	Bajo	0	Bajo	75	Alto
Pulimento del agregado	25	Medio	60	Alto	0	Bajo	0	Bajo	25	Medio
Fisuración de borde	75	Alto	35	Bajo	85	Alto	65	Alto	0	Bajo
Fisuración Longitudinal	100	Alto	125	Alto	0	Bajo	0	Bajo	5	Bajo
Fisuración por reflexión de juntas	0	Bajo	0	Bajo	0	Bajo	0	Bajo	0	Bajo
Fisuración Transversal	75	Alto	35	Alto	0	Bajo	0	Bajo	65	Alto
Parches	60	Alto	125	Alto	0	Bajo	0	Bajo	100	Alto
Ahuellamiento	0	Bajo	0	Bajo	75	Alto	125	Alto	25	Bajo
Ondulación	0	Bajo	15	Bajo	140	Alto	0	Bajo	5	Bajo
Exudación	0	Bajo	0	Bajo	0	Bajo	0	Bajo	0	Bajo
Afloramiento de finos	0	Bajo	75	Alto	0	Bajo	0	Bajo	0	Bajo
Baches	65	Alto	70	Alto	0	Bajo	0	Bajo	0	Bajo
Pérdida del agregado	75	Alto	150	Alto	0	Bajo	0	Bajo	0	Bajo
Separación de la berma	0	Bajo	0	Bajo	0	Bajo	25	Bajo	0	Bajo

Fuente: Autora (2023).

Tabla 46. Frecuencia de las manifestaciones patológicas del estudio de caso en la ciudad de Foz do Iguaçu (unidades de medida en metros).

INDICADORES	VÍAS URBANAS														
	1			2			3			4			5		
	larg.	anch.	prof.	larg.	anch.	prof.	larg.	anch.	prof.	larg.	anch.	prof.	larg.	anch.	prof.
Piel de cocodrilo	100	0,3	0	250	0,45	0	60	7	0	50	1	0	500	9	0
Fisuración en bloques	500	9	0	500	9	0	500	9	0	5	2,5	0	50	9	0
Pulimento del agregado	15	0,15	0	500	7	0	0,7	0,15	0	140	2,5	0	0	0	0
Fisuración de borde	0	0	0	500	0,3	0	0	0	0	0	0	0	250	0,15	0
Fisuración Longitudinal	0	0	0	500	9	0	0	0	0	150	0,3	0	300	9	0
Fisuración por reflexión de juntas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fisuración Transversal	9	0,45	0	9	0,45	0	4	0,3	0	9	0,3	0	2	0,3	0
Parches	30,6	1,6	0	0	0	0	45	5	0,035	0,5	1	0	9	7	0,02
Ahuellamiento	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ondulación	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	3,5	0	7	4	0
Exudación	33	0,25	0	23	0	0	250	0,45	0	0	0	0	0	0	0
Afloramiento de finos	500	9	0	100	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Baches	0,5	0,5	0,01	0	0	0	0,45	0,2	0,005	0	0	0	1	0,15	0,01
Pérdida del agregado	500	9	0	130	1	0	10	0,15	0	150	4,5	0	0	0	0
Separación de la berma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

INDICADORES	VÍAS URBANAS														
	6			7			8			9			10		
	larg.	anch.	prof.	larg.	anch.	prof.	larg.	anch.	prof.	larg.	anch.	prof.	larg.	anch.	prof.
Piel de cocodrilo	140	9	0	300	9	0	7	0,45	0,019	220	1,5	0	100	0,45	0
Fisuración en bloques	500	9	0	180	4,3	0	0	0	0	0	0	0	250	9	0
Pulimento del agregado	100	2	0	100	2,5	0	0	0	0	0	0	0	150	9	0
Fisuración de borde	300	0,15	0	400	0,3	0	1,5	0,3	0	2	0,3	0	0	0	0
Fisuración Longitudinal	500	9	0	200	9	0	0	0	0	0	0	0	275	9	0
Fisuración por reflexión de juntas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fisuración Transversal	9	0,45	0	9	0,3	0	0	0	0	0	0	0	250	9	0
Parches	15	1	0	5	7	0,03	0	0	0	0	0	0	5	7	0
Ahuellamiento	0	0	0	0	0	0	5	1	0,12	15	2,5	0	2,2	9	0,01
Ondulación	0	0	0	7	3	0	5	1	0,15	0	0	0	1,6	0,7	0
Exudación	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Afloramiento de finos	0	0	0	120	0,45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Baches	0,7	1	0,02	47	4,5	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pérdida del agregado	100	7	0	410	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Separación de la berma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,75	0,2	0	0	0	0

Fuente: Autora (2023).