



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

**MODELO DE MANTENIMIENTO SOSTENIBLE PARA VÍAS DE PRIMER
ORDEN UTILIZANDO *BIM-GIS*: VÍA MACHALA – INTERSECCIÓN CON LA
VÍA TRONCAL E-25 (VÍA A BALOSA)**

JAKELIN DEL CARMEN CONZA HERRERA

INFORME DE INVESTIGACIÓN

**TUTOR ING. EDUARDO ALEJANDRO TUSA JUMBO, PhD.
COTUTOR ING. JAVIER OYOLA ESTRADA, M.SC.**

**MACHALA
2022**

PENSAMIENTO

“Una gestión de pavimentos eficiente y efectiva nos permite contribuir a una infraestructura vial sostenible, que provee movilidad, acceso seguro y comfortable a un costo razonable y sin dañar el medio ambiente”

Gerardo Flintsch

DEDICATORIA

A Jehová, nuestro padre celestial, que con su infinita bondad me ha protegido en cada paso y me brindado fortaleza para avanzar por este camino llamado vida.

A mis padres: Luis Artemio Conza Valladarez y Rosa Delia Herrera Jaramillo, quienes con su sabiduría y nobleza me enseñaron que lo más importante es la dignidad y la integridad con la que se debe conseguir los objetivos. De quienes heredé la fortaleza y el carácter para cumplir con honor los compromisos adquiridos.

A mis hermanos: Franklin, Blanca, Henry, Jarry, Janneth, Edwin y Alexander; personas valientes e inteligentes, quienes han sido mi referente y mi inspiración, ellos que donde van destacan por su valía, su solidaridad y honorabilidad.

A mi hija Nahiely Ainhoa Garzón Conza, mi luz, mi norte, mi mayor motivación, ella que es mi esencia, la que cada día con su sonrisa llena mi mundo de magia y color, mi pequeña princesa, mi brisa fresca, mi amanecer cálido y protector, mi corazón valiente, mi inspiración infinita, para ella todo mi esfuerzo vale la pena.

A los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Civil, con quienes tuve la oportunidad de compartir momentos de aprendizaje y de enseñanza, también se integran a la motivación para emprender este desafío, muchos de ellos ya son colegas, y los demás están por culminar la carrera.

A quienes les pueda ser de utilidad este pequeño aporte académico.

No existe camino a la excelencia si éste no se construye con honor

Jakelin

AGRADECIMIENTO

A Jehová Dios, que siempre me ha protegido, me ha dado la fortaleza en los momentos de dificultad.

A mi hija Nahiely Ainhoa, por ser mi baluarte, mi inspiración y mi amor infinito.

A mi familia por su apoyo incondicional y aporte económico que me permitieron culminar este trabajo.

A la Secretaría de Educación Superior Ciencia Tecnología e Innovación, por el apoyo financiero a través de una beca que cubre un porcentaje del costo de la maestría.

A la Universidad Técnica de Machala, generadora de nuevos espacios de perfeccionamiento profesional. A los Docentes y Colaboradores de la Maestría.

Al Tutor: Ingeniero Eduardo Alejandro Tusa Jumbo, por su generosidad y solidaridad manifiesta durante el desarrollo de este trabajo.

Al Cotutor: Ing. Javier Oyola Estrada, por sus valiosos consejos y motivación para avanzar en este proceso académico.

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, Jakelin Del Carmen Conza Herrera con CC. 0701911596, declaro que el trabajo de “Modelo de Mantenimiento Sostenible para Vías de Primer Orden Utilizando *BIM-GIS*: Vía Machala – Intersección con la Vía Troncal E-25 (Vía a Balosa)”, en opción al título de Magister en Ingeniería Civil, mención Vialidad, es original y auténtico; cuyo contenido: conceptos, definiciones, datos empíricos, criterios, comentarios y resultados son de mi exclusiva responsabilidad.



JAKELIN DEL CARMEN CONZA HERRERA

C.C. 0701911596

Machala, 2022/06/06

REPORTE DE SIMILITUD TURNITIN

Tesis

INFORME DE ORIGINALIDAD

| | | | |
|---------------------|---------------------|---------------|-------------------------|
| 5 % | 5 % | 1 % | 1 % |
| INDICE DE SIMILITUD | FUENTES DE INTERNET | PUBLICACIONES | TRABAJOS DEL ESTUDIANTE |

FUENTES PRIMARIAS

| | | |
|----------|--|----------------|
| 1 | Submitted to Universidad Privada Antenor Orrego Trabajo del estudiante | <1 % |
| 2 | worldwidescience.org Fuente de Internet | <1 % |
| 3 | www.dspace.uce.edu.ec Fuente de Internet | <1 % |
| 4 | downloads.gvsig.org Fuente de Internet | <1 % |
| 5 | www.esri.co Fuente de Internet | <1 % |
| 6 | repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 7 | docplayer.com.br Fuente de Internet | <1 % |
| 8 | www.vialidadsexta.co.cl Fuente de Internet | <1 % |

CERTIFICADO DEL TUTOR

En calidad de Tutor del Trabajo de titulación "MODELO DE MANTENIMIENTO SOSTENIBLE PARA VÍAS DE PRIMER ORDEN UTILIZANDO SISTEMAS *BIM-GIS*, VÍA MACHALA – INTERSECCIÓN CON LA VÍA TRONCAL E-25 (VÍA A BALOSA), 2020" elaborado por la Ing. Jakelin Del Carmen Conza Herrera, considero que ha sido realizado con prolijidad, fundamentación teórica y técnica; y, de acuerdo a los requisitos exigidos por la organización del Programa de Maestría en Ingeniería Civil, mención Vialidad, por lo que autorizo su presentación ante las instancias de aprobación correspondiente.



ING. EDUARDO ALEJANDRO TUSA JUMBO, PhD.

C.C. 0704323427

Machala, 2022/06/06

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Jakelin Del Carmen Conza Herrera, con CC. 0701911596, autora del trabajo de titulación "Modelo de Mantenimiento Sostenible para Vías de Primer Orden Utilizando BIM-GIS: Vía Machala – Intersección con la Vía Troncal E-25 (Vía a Balosa)", en opción al título de Magister en Ingeniería Civil, mención Vialidad, declaro que:

- El trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido presentado previamente para ningún grado o calificación profesional. En consecuencia, asumo la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva
- Cede a la Universidad Técnica de Machala con referencia a la obra en formato digital los derechos de:
 - a. Incorporar la mencionada obra en el repositorio institucional para su demostración a nivel mundial, respetando lo establecido por la Licencia *Creative Commons Attribution-NoCommercial* – Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY NCSA 4.0); la Ley de Propiedad Intelectual del Estado Ecuatoriano; el Reglamento Institucional y el Reglamento de becas de la Secretaría de Educación Superior Ciencia, Tecnología e Innovación.
 - b. Adecuarla a cualquier formato o tecnología de uso en INTERNET, así como correspondiéndome como Autora la responsabilidad de velar por dichas adaptaciones con la finalidad de que no se desnaturalice el contenido o sentido de la misma.



JAKELIN DEL CARMEN CONZA HERRERA

C.C. 0701911596

Machala, 2022/06/06

RESUMEN

El objetivo del trabajo de investigación es describir un modelo de mantenimiento sostenible, utilizando *Building Information Modeling (BIM)* y *Geographic Information Systems (GIS)* para mejorar la eficiencia de vías de primer orden. Inicialmente en la investigación se realizaron estudios exploratorios, mediante un análisis documental-cualitativo del objeto de estudio a través de la búsqueda, lectura e interpretación de la información de fuentes primarias y secundarias sobre el mantenimiento de vías y nuevas tecnologías de la información. A continuación, se orientó a los estudios descriptivos de las variables, se hizo un análisis cualitativo y cuantitativo y se aplicó los métodos: teórico y empírico. Finalmente se correlacionan las variables con enfoque descriptivo. Con el uso de los sistemas de información geográfica, se logró convertir datos digitales en otros formatos, los mismos que son integrados a un entorno colaborativo de trabajo común, que permite centralizar toda la información en un modelo, optimizando los procesos de mantenimiento de las vías de primer orden. En este trabajo se describió el modelo de mantenimiento sostenible, utilizando *Building Information Modeling* y *Geographic Information Systems*, se creó una base de datos de fácil acceso, que facilitó la elaboración de modelos de predicción de la condición del pavimento, el análisis de criterios y toma de decisiones en la selección oportuna de intervenciones de mantenimiento; por lo tanto, se mejoró la eficiencia de las vías de primer orden. El análisis documental de otras investigaciones, permitió la fundamentación teórica y conceptual de las características de los modelos de mantenimiento sostenible, como de la interoperabilidad del *BIM* y *GIS*. Asimismo, la asesoría de expertos en el área fortaleció este trabajo de investigación. No obstante, los limitados recursos informáticos (softwares con licencia vigente) y bibliográficos (artículos científicos de revistas indexadas de pago), dificultaron el proceso e incrementaron el tiempo de ejecución de la investigación.

PALABRAS CLAVES:

Mantenimiento, Sostenible, Pavimentos flexibles, *BIM*, *GIS*, Modelos de Predicción, Toma de Decisiones.

ABSTRACT

The objective of the research work is to describe a sustainable maintenance model, using Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information Systems (GIS) to improve the efficiency of first-order roads. Initially in the research, exploratory studies were carried out, through a documentary-qualitative analysis of the object of study through the search, reading and interpretation of information from primary and secondary sources on the maintenance of roads and new information technologies. This was followed by descriptive studies of the variables, a qualitative and quantitative analysis was made, and the theoretical and empirical methods were applied. Finally, the variables are correlated with a descriptive approach. With the use of geographic information systems, it was possible to convert digital data into other formats, which are integrated into a collaborative common work environment, which allows all the information to be centralized in a model, optimizing road maintenance processes of the first order. In this work, the sustainable maintenance model was described, using Building Information Modeling and Geographic Information Systems, an easily accessible database was created, which facilitated the elaboration of prediction models of the condition of the pavement, the analysis of criteria and taking decision-making in the timely selection of maintenance interventions; therefore, the efficiency of the first-order roads was improved. The documentary analysis of other investigations allowed the theoretical and conceptual foundation of the characteristics of the sustainable maintenance models, as well as the interoperability of BIM and GIS. Likewise, the advice of experts in the area strengthened this research work. Notwithstanding the limited computing resources (software with a valid license) and bibliographic resources (scientific articles from paid indexed journals), made the process difficult and increased the execution time of the research.

KEY WORDS:

Maintenance, Sustainable, Flexible pavements, BIM, GIS, Prediction Models, Decision Making.

ÍNDICE GENERAL

| | pág. |
|--|------|
| PENSAMIENTO | 3 |
| DEDICATORIA | 4 |
| AGRADECIMIENTO | 5 |
| RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA | 6 |
| REPORTE DE SIMILITUD TURNITIN | 7 |
| CERTIFICADO DEL TUTOR | 8 |
| CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR | 9 |
| RESUMEN | 10 |
| ABSTRACT..... | 11 |
| ÍNDICE GENERAL | 12 |
| LISTA DE ILUSTRACIONES Y TABLAS | 16 |
| LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS | 19 |
| INTRODUCCIÓN | 20 |
| CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO..... | 23 |
| 1.1 Antecedentes Históricos | 23 |
| 1.1.1 Historia de las vías y evolución del mantenimiento | 23 |
| 1.2 Antecedentes Conceptuales | 26 |
| 1.2.1 Mantenimiento de vías..... | 26 |
| 1.2.2 Sistemas de gestión de la infraestructura vial | 26 |
| 1.2.2.1 Niveles de gestión de mantenimiento | 28 |
| 1.2.3 Gestión sostenible de la infraestructura vial | 29 |
| 1.2.4 Sistema de gestión de pavimentos | 32 |
| 1.2.5 Componentes de un sistema de gestión de pavimentos | 33 |
| 1.2.5.1 Objetivos y políticas | 33 |
| 1.2.5.2 Creación de base de datos (inventario vial) | 33 |

| | |
|---|-----------|
| 1.2.5.3 Base de datos (inventario)..... | 35 |
| 1.2.5.4 Evaluación del pavimento..... | 37 |
| 1.2.5.5 Predicción de la Condición de Pavimento Flexible | 40 |
| 1.2.5.6 Estrategias de Intervención en el Mantenimiento de las Vías | 46 |
| 1.2.5.7 Toma de decisiones en la gestión de pavimentos | 51 |
| 1.2.6 Tecnológicas aplicadas a los sistemas de gestión de mantenimiento de vías | 58 |
| 1.2.6.1 Geographic Information Systems (GIS) | 58 |
| 1.2.6.2 Building Information Modeling (BIM)..... | 59 |
| 1.2.6.3 Integración BIM y GIS | 60 |
| 1.3 Antecedentes Referenciales | 62 |
| 1.4 Antecedentes Contextuales | 66 |
| 1.4.1 Ubicación geográfica y política | 66 |
| 1.4.2 Características del área de estudio | 67 |
| 1.4.2.1 Topografía..... | 68 |
| 1.4.2.2 Clima..... | 68 |
| 1.4.2.3 Población beneficiaria..... | 69 |
| CAPITULO 2 MÉTODOS | 70 |
| 2.1 Métodos | 70 |
| 2.1.1 Teórico Documental | 70 |
| 2.1.2 Empírico de Campo | 71 |
| 2.2 Tipos de Estudio | 71 |
| 2.3 Paradigma | 72 |
| 2.4 Enfoques | 72 |
| 2.5 Población y Muestra | 73 |
| 2.6 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos | 74 |
| 2.7 Descripción del Procedimiento | 74 |
| CAPÍTULO 3 RESULTADOS..... | 76 |

| | | |
|---|---|------------|
| 3.1 | Objetivos y Políticas | 76 |
| 3.2 | Base de datos (Inventario) | 77 |
| 3.2.1 | Geometría de la Vía Balosa | 78 |
| 3.2.2 | Estudio del tráfico | 79 |
| 3.2.3 | Estructura del pavimento de la vía..... | 81 |
| 3.2.4 | Condiciones climáticas | 81 |
| 3.2.5 | Definición de los puntos críticos | 82 |
| 3.3 | Evaluación del pavimento..... | 83 |
| 3.3.1 | Determinación de unidades de muestreo | 84 |
| 3.3.2 | Criterios de inspección y registro de información | 85 |
| 3.3.3 | Índice de condición del pavimento (PCI) | 86 |
| 3.4 | Modelos de Predicciones PCI..... | 87 |
| 3.5 | Estrategias de mantenimiento | 90 |
| 3.5.1 | Tratamientos considerados para la vía Balosa | 91 |
| 3.5.2 | Efectos de la aplicación del tratamiento | 91 |
| 3.6 | Toma de decisiones en el proceso de mantenimiento de la vía Balosa | 94 |
| 3.6.1 | Modelo de toma de decisiones aplicando la propuesta de Tavakoli et al (1992) | 94 |
| 3.6.2 | Modelo de decisión multicriterio aplicando el método AHP..... | 96 |
| 3.7 | Retroalimentación, Actualización de datos | 102 |
| 3.8 | Modelo en Infracworks..... | 103 |
| CAPÍTULO 4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS | | 106 |
| 4.1 | Discusión de resultados | 106 |
| 4.2 | Comparación con otros modelos..... | 108 |
| 4.3 | Limitaciones del modelo..... | 114 |
| 4.4 | Líneas de investigación futura | 115 |
| CONCLUSIONES | | 116 |

| | |
|--|-----|
| RECOMENDACIONES | 119 |
| BIBLIOGRAFÍA | 120 |
| ANEXOS | 128 |
| Anexo A. Antecedentes Históricos de las Carreteras | 128 |
| Anexo B. Elementos geométricos de la vía | 135 |
| Anexo C. Objetivos y Políticas planteados por varios autores | 142 |
| Anexo D. Contribuciones de varios investigadores sobre inventario de vías | 143 |
| Anexo E. Deterioros de Pavimentos Flexibles, Norma ASTM D 6433 | 144 |
| Anexo F. Contribuciones de autores sobre el proceso de evaluación del pavimento | 149 |
| Anexo G. Contribuciones de autores sobre modelos de predicción de deterioro del pavimento | 150 |
| Anexo H. Intervención en Función de los Niveles de Deterioro del Pavimento Flexible | 151 |
| Anexo I. Tratamientos preventivos y correctivos en pavimento de asfalto. | 153 |
| Anexo J. Contribuciones de autores sobre estrategias de mantenimiento de pavimento | 156 |
| Anexo K. Contribuciones de investigadores sobre modelos de toma de decisiones..... | 157 |
| Anexo L. Guía de entrevista no estructurada | 158 |
| Anexo M. Modelo de mantenimiento sostenible de la vía Balosa | 159 |
| Anexo N. Formulario de Registro de Condición del Pavimento..... | 160 |
| Anexo O. Modelo Conceptual en Infraworks..... | 161 |

LISTA DE ILUSTRACIONES Y TABLAS

Ilustraciones

| | pág. |
|--|------|
| Figura 1. Historia de las Carreteras | 24 |
| Figura 2. Evolución de los planes de mantenimiento de las vías | 25 |
| Figura 3. Diagrama de un Sistema de Gestión de Infraestructura Vial | 27 |
| Figura 4. Beneficios y Problemas al aplicar un Sistema de Gestión de Infraestructura Vial..... | 28 |
| Figura 5. Niveles de gestión de mantenimiento..... | 29 |
| Figura 6. Pilares Esenciales de Sostenibilidad, Planteados por Naciones Unidas..... | 30 |
| Figura 7. Sistema de Gestión de Pavimentos Flexibles | 32 |
| Figura 8. Formato de Inspección Visual de Condición de Pavimento, Norma ASTM D 6433-07 | 36 |
| Figura 9. Numeración de Carriles para Vías de una sola Calzada..... | 36 |
| Figura 10. Rangos de Calificación del índice de condición del pavimento (PCI)..... | 38 |
| Figura 11. Comportamiento de la Condición del Pavimento sin y con Mantenimiento. 41 | |
| Figura 12. Tipos de Modelo de Predicción de Deterioros de una Infraestructura Vial .. | 42 |
| Figura 13. Rangos de Valores de los Principales Parámetros Basados en Datos Empíricos | 45 |
| Figura 14. Parámetros Estadísticos de los Modelos Predictivos de Condición del Pavimento | 45 |
| Figura 15. Índice de la Condición del Pavimento y Categoría de Mantenimiento | 49 |
| Figura 16. Sistema de Análisis Jerárquico (AHP) | 56 |
| Figura 17. Flujos de Trabajo Generados por la Integración BIM y GIS | 61 |
| Figura 18. Plano de Ubicación Vía Balosa | 67 |
| Figura 19. Procedimiento de la metodología de investigación aplicada..... | 75 |
| Figura 20. Modelo de Gestión de Mantenimiento Sostenible de Pavimento de la Vía Balosa..... | 76 |
| Figura 21. Geodatabase de la Información de la Vía Balosa..... | 77 |
| Figura 22. Características Geométricas de la Sección Transversal de la Vía Balosa..... | 78 |

| | |
|---|-----|
| Figura 23. Trazado del Eje de la Vía Balosa, en ArcGIS | 79 |
| Figura 24. Evaluación de Zonas para Monitoreo Continuo de la Condición de la Vía.. | 82 |
| Figura 25. Zonas Prioritarias de Evaluación de la Condición de la Vía Balosa | 83 |
| Figura 26. Identificación de Carriles y Sentido del Abscisado para Tramificación de la Vía..... | 84 |
| Figura 27. Diagrama de Muestras a Evaluar e Intervalos | 85 |
| Figura 28. Recolección de Información de condición de pavimento en Excel (macros) | 86 |
| Figura 29. Valores PCI de las Unidades de Muestra de la Vía Balosa..... | 87 |
| Figura 30. Curvas de Modelos de Deterioro Predictivo de la Vía Balosa | 88 |
| Figura 31. Curva de Comportamiento de Deterioro Predictivo de la Vía Balosa..... | 90 |
| Figura 32. Acciones de mantenimiento en función del PCI | 90 |
| Figura 33. Modelo de Deterioro del Pavimento antes y después del Tratamiento | 92 |
| Figura 34. Comportamiento del Pavimento antes y después del Mantenimiento..... | 92 |
| Figura 35. Modelo Tavakoli para la Toma de Decisiones de Mantenimiento, Vía Balosa | 96 |
| Figura 36. AHP para la Toma de Decisiones en la Gestión de Mantenimiento de la Vía Balosa..... | 101 |
| Figura 37. Mapas por Índice del Estado del Pavimento | 102 |
| Figura 38. Mapas por Eventos de Intervención de Mantenimiento | 103 |

Tablas

| | pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1. Valores de Zo en Función del Nivel de Incertidumbre..... | 43 |
| Tabla 2. Factores de Cálculo del Índice de Prioridades en Intervención de Vías..... | 53 |
| Tabla 3. Escala Fundamental de Comparaciones de Alternativas Pareadas..... | 56 |
| Tabla 4. Criterios del Proceso de Optimización de Estrategias de Mantenimiento..... | 57 |
| Tabla 5. Aportes de investigadores sobre criterios de selección en modelo de toma de decisiones..... | 58 |
| Tabla 6. Contribuciones de autores sobre modelos de mantenimientos de pavimentos. | 63 |
| Tabla 7. Coordenadas UTM de la Vía Balosa | 67 |
| Tabla 8. Características Geométricas de la Vía Balosa | 78 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 9. Conteo de Vehículos en la Vía Balosa..... | 80 |
| Tabla 10. Tráfico Promedio Diario Anual de la Vía Balosa..... | 80 |
| Tabla 11. Tráfico Futuro de la Vía Balosa..... | 81 |
| Tabla 12. Diseño de Pavimento de la Vía Balosa..... | 81 |
| Tabla 13. Cálculo de Unidades de Muestra a ser Evaluadas | 84 |
| Tabla 14. Modelos de Predicción de Deterioro de Pavimento Flexible | 88 |
| Tabla 15. Actuaciones de Mantenimiento de Pavimento Flexible para Vía Balosa..... | 91 |
| Tabla 16. Cálculo del PI para la Toma de Decisiones de las Acciones de Intervención | 95 |
| Tabla 17. Criterios Considerados en Modelo Multicriterio para la Toma de Decisiones | 97 |
| Tabla 18. Emisiones de CO ₂ Generadas por las Actuaciones de Mantenimiento | 98 |
| Tabla 19. Emisiones CO ₂ por Acciones de Mantenimiento en la Vía Balosa | 98 |
| Tabla 20. Niveles de Importancia de la Infraestructura Social Cercana a la Vía Balosa | 99 |
| Tabla 21. Criterios para el Análisis Jerárquico en la Toma de Decisiones, Vía Balosa. | 99 |
| Tabla 22. Cálculo del Índice General Aplicando el método AHP en la Toma de Decisiones..... | 100 |

LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

Abreviaturas

| | |
|----------------|---|
| <i>AASHTO:</i> | <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i> , en español, Asociación Americana de Autoridades Estatales de Carreteras y Transporte. |
| <i>AHP</i> | <i>Analytical Hierarchy Proces</i> |
| <i>ASTM:</i> | <i>American Society for Testing Materials</i> , en español, Asociación Americana para el Ensayo de Materiales |
| <i>BIM:</i> | <i>Building Information Modeling</i> |
| <i>ESAL:</i> | <i>Equivalent Standard Axle Loads</i> , en español, Cargas Equivalentes de Ejes Sencillos estándar de 8.2 toneladas |
| <i>GIS:</i> | <i>Geographic Information Systems</i> |
| <i>MTOP:</i> | Ministerio de Transporte y Obras Públicas |
| <i>PCI:</i> | <i>Pavement Condition Index</i> |
| <i>TPDA:</i> | Tránsito Promedio Diario Anual |
| <i>UTM:</i> | <i>Universal Transverse Mercator</i> , Coordenadas UTM |
| <i>WGS84:</i> | <i>World Geodetic System 84</i> (Sistema Geodésico Mundial 1984) |

Símbolos

| | |
|----------|---------------------|
| & | and |
| Δ | delta |
| σ | desviación estándar |
| \pm | más , menos |
| m | metro |
| \geq | mayor, igual |
| Σ | sumatoria |

INTRODUCCIÓN

El mantenimiento de la red viaria de un país es fundamental para garantizar la eficiencia de las vías; siempre debe planificarse para proporcionar seguridad a los usuarios, a menor costo y haciendo uso responsable de los recursos naturales. Esta investigación propone un modelo de gestión de mantenimiento sostenible de pavimentos, que usa las tecnologías de la información para trabajar en un entorno colaborativo, de fácil acceso a una base de datos georreferenciados; disminuyendo el tiempo de análisis, de la elaboración de modelos de predicción de deterioros del pavimento y de la toma de decisiones, para facilitar la oportuna selección de los tratamientos preventivos con menor impacto ambiental. En consecuencia, esta automatización en los procesos permite adoptar medidas oportunas para mantener la vía en condiciones de eficiencia a lo largo de su vida útil.

En el Ecuador, el mantenimiento de vías se gestiona mediante la implementación de un sistema de activos, que de acuerdo a Flintsch (2019), se caracteriza por tener definido sus indicadores de desempeño, sin embargo no se tiene mayor detalle de los mismos, ni se dispone de un plan de gestión integral; por consiguiente no hay una base de datos de acceso común y colaborativo para registrar la información relacionada a la condición de pavimentos, puentes y de otros elementos de la vía, de manera georreferenciada, que faciliten el análisis del ciclo de vida de cada elemento y la toma de decisiones en los procesos de mantenimiento de vías.

En la provincia de El Oro, el mantenimiento de las vías se realiza según los planes debidamente fundamentados en la norma ecuatoriana vigente, sin embargo, la poca información histórica de los mantenimientos realizados, la falta de automatización en los procesos, hace que estos planes sean ineficientes, que los tiempos de análisis y toma de decisiones se dilaten; no se puede utilizar eficientemente los recursos económicos y por lo tanto se incrementan los problemas de deterioro del pavimento. De modo que, disminuye el nivel de eficiencia de la vía.

La pregunta de investigación que se formula es ¿Cómo influye la gestión de mantenimiento de pavimento en la eficiencia de las vías de primer orden?; el objeto de estudio es el Mantenimiento de la Vía Machala – Intersección con la Vía Troncal E-25 (Vía a Balosa). Las causas que dan origen al problema son: ineficientes planes de mantenimiento, inexistente automatización de procesos, flujos de trabajo inconexos, falta de operatividad entre los recursos tecnológicos.

En esta investigación se plantea como objetivo general, proponer un modelo de gestión de mantenimiento sostenible de pavimento, utilizando *Building Information Modeling (BIM)* y *Geographic Information Systems (GIS)*, para el mejoramiento de la eficiencia de las vías de primer orden. Para cumplir con este objetivo general se formulan los siguientes objetivos específicos: examinar estudios de mantenimiento sostenible de pavimento en función del uso de la tecnología, que garantice la eficiencia de las vías de primer orden; detallar las características técnicas de la vía Balosa, mediante la revisión de las memorias de diseño; y diseñar un modelo de gestión de mantenimiento sostenible de pavimento de la vía Balosa, mediante la interoperabilidad del *BIM* y *GIS*.

La investigación se realizó en la Vía Machala – Intersección con la Vía Troncal E-25 (Vía Balosa). Para desarrollar el presente trabajo se planteó las siguientes preguntas de investigación: ¿Cómo influye el modelo de gestión de mantenimiento de pavimentos en la eficiencia de las vías de primer orden?, ¿qué estudios son necesarios para determinar el mantenimiento y su relación con la eficiencia de las vías de primer orden?, ¿cuáles son las características de la vía Machala – intersección con la vía troncal E-25 (vía Balosa)?, ¿qué modelo de gestión de mantenimiento sostenible de pavimento mejora la eficiencia de las vías de primer orden?

En esta investigación se utilizó el enfoque exploratorio, en un primer momento, al realizar el análisis documental del objeto de estudio; a continuación, se orientó a los estudios descriptivos de las variables mantenimiento sostenible y vías de primer orden, se hizo un análisis cualitativo y cuantitativo y los métodos aplicados son: teóricos (análisis y síntesis documental) y empíricos (de campo, entrevistas). Luego se correlacionan las variables: mantenimiento sostenible y la eficiencia de las vías de primer orden, con enfoque descriptivo.

El presente trabajo se ha estructurado por capítulos: el Capítulo 1 corresponde al Marco Teórico de los estudios de: mantenimiento sostenible de pavimento, de gestión de activos de infraestructura vial, de modelos de predicción de deterioros, de análisis de decisión multicriterio, de los sistemas *GIS* y *BIM*; El Capítulo 2 describe los métodos teóricos y empíricos aplicados en el desarrollo del trabajo de investigación con enfoque descriptivo; en el Capítulo 3 se describen los resultados del modelo de mantenimiento sostenible de pavimentos de la vía Balosa; en el Capítulo 4 se presenta el análisis de resultados y finalmente se expone las Conclusiones y Recomendaciones.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes Históricos

1.1.1 Historia de las vías y evolución del mantenimiento

El crecimiento poblacional de las ciudades de las primeras civilizaciones, la necesidad de transportación de productos agrícolas a centros de comercialización, hicieron necesario la construcción de los primeros caminos. Estos caminos muy antiguos que según Moreno Gallo (2006), tenían características diferentes entre sí, en función del uso, la necesidad que llevaron a su construcción, los recursos disponibles y la metodología de trabajo aplicada en su momento. Estos caminos eran sencillas sendas ganaderas de piedra que se construyeron por todo el mundo y por todas las culturas, estos caminos se han encontrado en las montañas de Sudamérica como en las de Europa.

Según Zorio Blanco (1987), la vía más antigua de larga distancia fue la carretera Real Persa, construida de ladrillo cocido y piedra unidos por mortero bituminoso. Este camino coexistió con las carreteras imperiales de China; las mismas que tenían calzadas amplias, cubiertas con piedra. Los egipcios construyeron una carretera en el Valle del Nilo, con un firme artificial, utilizada para el transporte de los grandes bloques de piedra con que se construyeron las pirámides.

Los romanos construyeron caminos eficientes, su técnica constructiva era única para su época; adoptaron medidas normativas para conservación, reparación y tránsito. Además construyeron un sistema de drenaje que permitía la reducción de la humedad y el incremento de la capacidad portante. Un ejemplo de esta técnica es la vía Apia.

En América existe indicios de caminos construidos por los Mayas, Aztecas e Incas; con avanzada técnica, siendo los más notables los *Caminos Blancos* de los Mayas y el camino del Inca o *Qhapag Ñan*. En la Figura 1, se muestra un extracto de la historia de las carreteras, expuesta en el Anexo A.

Figura 1

Historia de las Carreteras

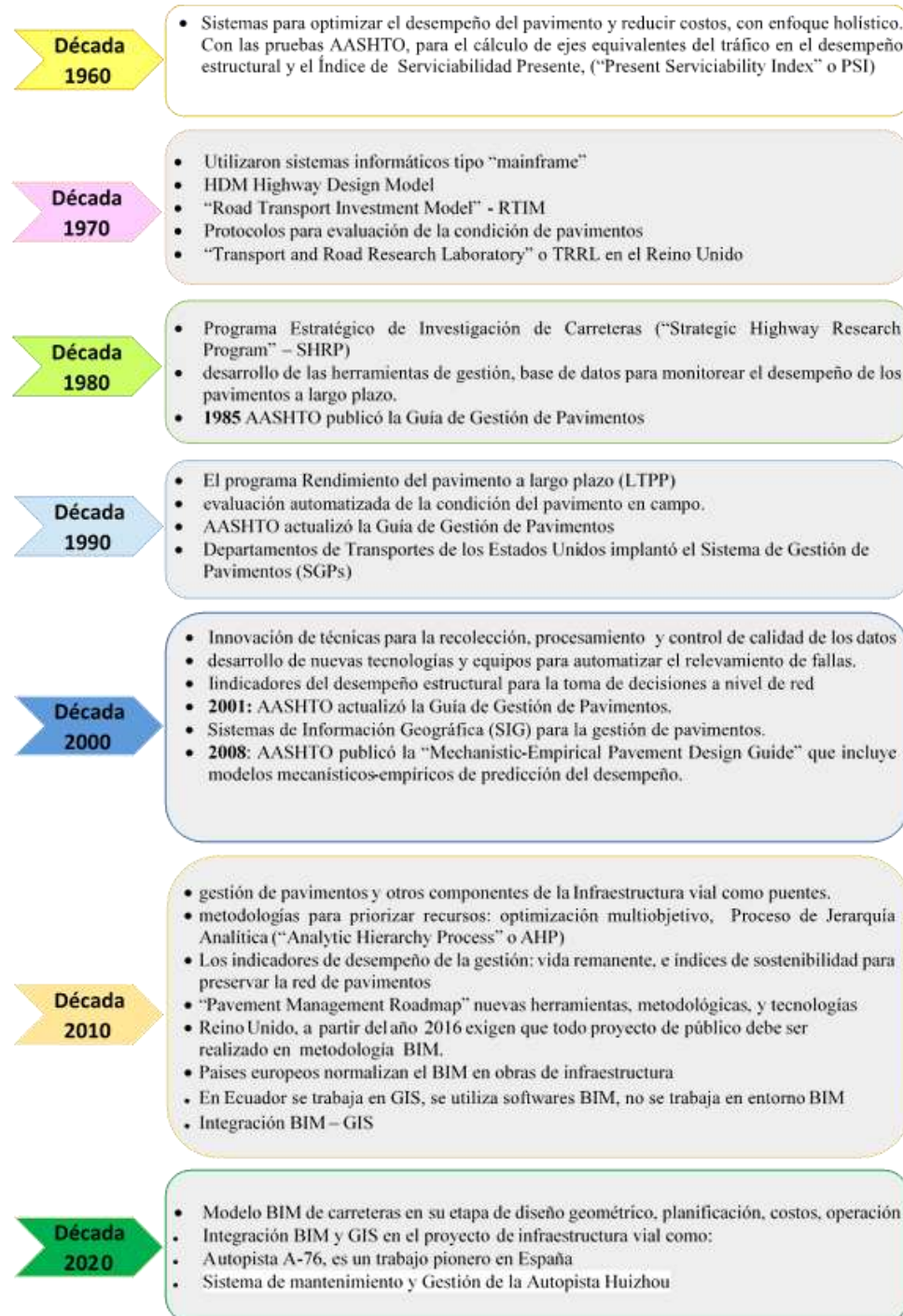


En la Figura 2, a partir de la contribución de Chang (2020), se registra la línea de tiempo de la gestión de mantenimiento, que ha evolucionado en virtud de las investigaciones

realizadas por diferentes instituciones que buscan gestionar de manera sostenible todos los recursos inherentes a mantener una vía en condiciones operativas y eficientes.

Figura 2

Evolución de los planes de mantenimiento de las vías



1.2 Antecedentes Conceptuales

Como un aporte al desarrollo conceptual de este trabajo se expone en el Anexo B, varios conceptos referentes a los elementos geométricos de la vía, así como, información relacionada a la clasificación de las carreteras, volúmenes de tráfico y otros elementos que permiten conocer de manera general a las vías de primer orden. A continuación se describe los elementos del plan de mantenimiento o modelo de gestión de mantenimiento de las vías o carreteras.

1.2.1 Mantenimiento de vías

De acuerdo con Almuhanha et al. (2018), el mantenimiento de vías está formado por actividades que conservan o mejoran el desempeño de cada parte de la red de carreteras bajo los estándares mínimos de servicio, garantizando las necesidades de transporte de la zona y de la protección del medio ambiente. De igual manera afirma, que los factores que inciden en la necesidad del mantenimiento de la carretera son: aumento de vehículos pesados; impacto de obras de bienestar público; exigencias de estándares más altos de conservación y operación de la vía; así como, los cambios climáticos.

En efecto, el mantenimiento de una carretera consiste en realizar acciones técnicas y administrativas en diferentes niveles de intervención y modalidad de ejecución, para ello se debe contar con recursos, un sistema de gestión y políticas públicas que garanticen el cumplimiento de las estrategias de conservación y operación de la vía bajo los estándares óptimos de servicio y de protección del entorno, durante su periodo de diseño.

1.2.2 Sistemas de gestión de la infraestructura vial

Un sistema de gestión vial tiene por objetivo utilizar la información de la infraestructura, para desarrollar criterios de decisión, plantear alternativas de inversión y contribuir de forma eficiente a la toma de decisiones; de tal manera que se mantengan las condiciones de servicio aceptables de un proyecto o red de carreteras. Además, se optimice el presupuesto y minimice los costes de usuarios; sin afectaciones significativas al medio ambiente, a la seguridad vial y a las actividades de la sociedad.

En la Figura 3, se muestra el sistema de gestión propuesto por la Administración Federal de Carreteras (FHWA) en 1999; el mismo que se fundamenta en un conjunto de datos estratégicos, como la definición de objetivos y políticas públicas de gestión y el presupuesto disponible para el mantenimiento; a esto se integra información técnica sobre la condición de los elementos que conforman la vía y las intervenciones realizadas.

Figura 3

Diagrama de un Sistema de Gestión de Infraestructura Vial



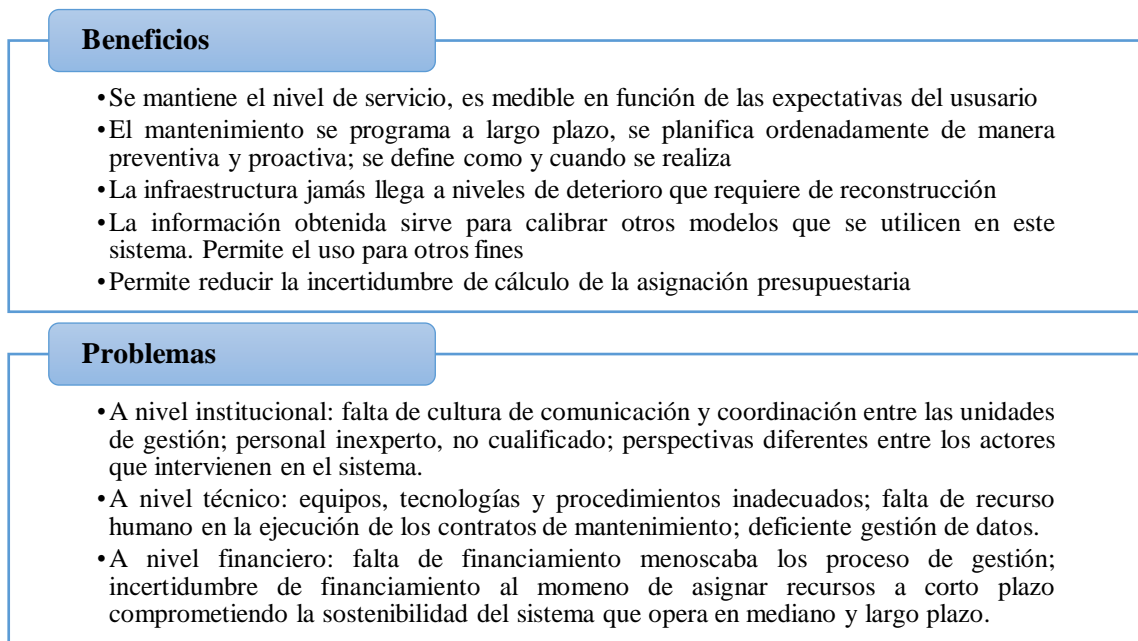
Fuente: Torres Machí (2015)

Como punto de partida se establece los objetivos y políticas de gestión del ente administrador; seguidamente se elabora el inventario; la información registrada se analiza para establecer los tramos y/o las vías que requieren intervención; después se establece la mejor estrategia de mantenimiento en función de los recursos disponibles. A continuación, se propone los planes de conservación, los mismos que se deben monitorear para garantizar la retroalimentación en el proceso de gestión de la infraestructura vial.

Los principales beneficios y problemas al implementar un sistema de gestión de infraestructura vial, son múltiples y de distinta naturaleza; En la Figura 4, se resume algunos aspectos considerados por Solminihac et al.(2018).

Figura 4

Beneficios y Problemas al aplicar un Sistema de Gestión de Infraestructura Vial



Un modelo de gestión efectivo debe garantizar una adecuada conservación de la infraestructura vial; sustentada en la optimización de costos, en el uso responsable de los recursos disponibles, en el control permanente del impacto en el medio ambiente generado por las intervenciones de mantenimiento. Además, se debe evaluar los tratamientos aplicados, y sus resultados deben ser registrados, analizados y validados.

Varios autores proponen sistemas de gestión eficiente de infraestructura vial de manera holística, sin embargo; también proponen sistemas de gestión de cada elemento que conforma la vía, por ejemplo: sistema de gestión de firmes o pavimento, de puentes, de drenaje, de seguridad vial, y otros. Además, los sistemas de gestión se realizan principalmente por niveles.

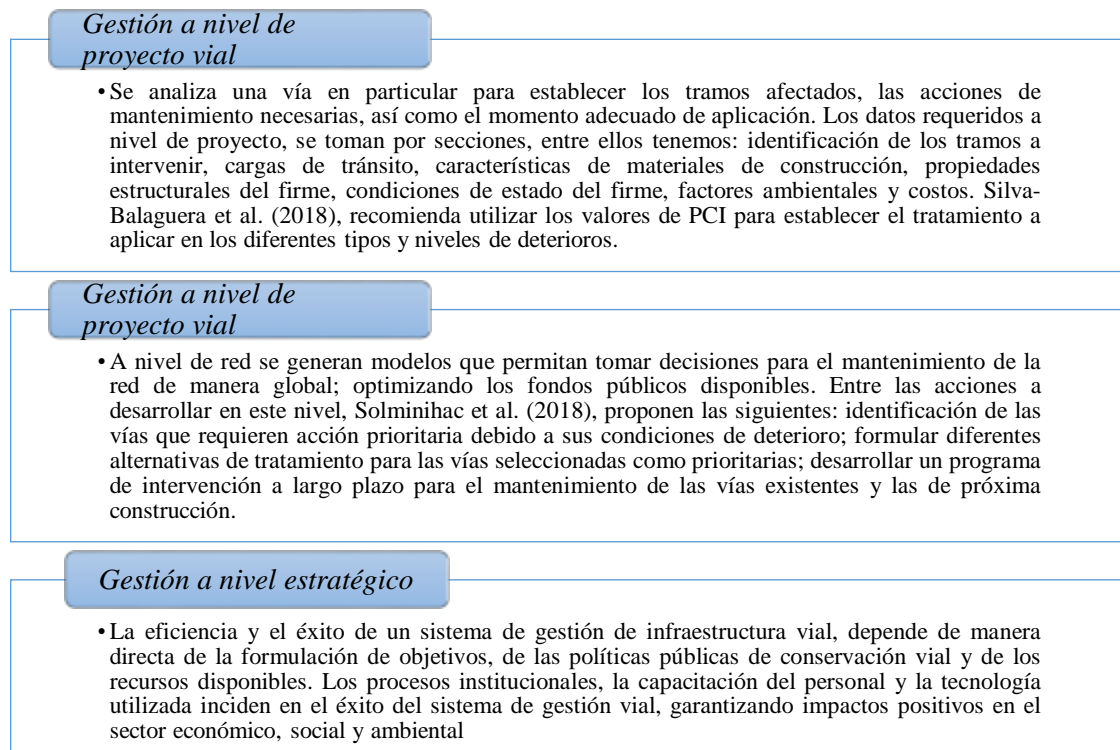
1.2.2.1 Niveles de gestión de mantenimiento

Los niveles de gestión de mantenimiento están definidos por el área de intervención y la calidad de información que se requiere, según el caso. Se identifican tres niveles de gestión, estos son: a nivel de proyecto, a nivel de red y a nivel estratégico. En la Figura 5

se expone los niveles de gestión de mantenimiento a partir de las contribuciones de Silva-Balaguera et al. (2018), Solminihac et al. (2018).

Figura 5

Niveles de gestión de mantenimiento



1.2.3 Gestión sostenible de la infraestructura vial

El tema ambiental se ha posesionado en la agenda pública de todas las regiones del mundo, vinculada a los procesos sociales y económicos. A partir de la publicación del Informe “Nuestro Futuro Común”, conocido como Informe *Brundtland*, se masifica el concepto de Desarrollo Sostenible como la integración equilibrada de los aspectos sociales, económicos y ambientales; de este modo, se satisface las necesidades de las generaciones presentes, sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades. Asimismo, busca atender la protección del medio ambiente en el proceso de desarrollo de los países.

Generalmente se ha considerado a los criterios técnicos y económicos en la evaluación de las infraestructuras; sin embargo, a partir del informe *Brundtland*, estos criterios son insuficientes al momento de una gestión sostenible; en este contexto las Naciones Unidas plantean como pilares de la sostenibilidad a los criterios económicos, ambientales y sociales. En la Figura 6, se expone los criterios de desarrollo sostenible; que buscan la cohesión social, mejorar la calidad de vida, el incremento de recursos equitativos y la protección al medio ambiente con el uso racional de los recursos naturales.

Figura 6

Pilares Esenciales de Sostenibilidad, Planteados por Naciones Unidas



Aceves-Gutierrez et al. (2020), indica que la industria de la construcción contribuye a la contaminación, en el área de la vialidad los impactos ambientales se generan cuando se construye la estructura del pavimento, debido a la gran cantidad de los materiales utilizados, a los equipos y la maquinaria por el uso de combustible fósil. En este contexto Santero & Horvath (2009), manifiesta que el pavimento bituminoso de carreteras incide en el desempeño ambiental del sector del transporte, en virtud de la cantidad considerable de efectos en el ambiente producidos en la etapa de construcción, mantenimiento y uso de los pavimentos viales.

En la opinión de Santos et al. (2020), los impactos negativos en el medio ambiente no disminuyen durante la etapa operativa de las carreteras, debido al envejecimiento del pavimento que requiere de reparaciones y mejoras urgentes. Asimismo, enfatiza que se podría experimentar consecuencias adversas en la condición del pavimento a causa de los fenómenos meteorológicos extremos como las inundaciones, lluvias torrenciales, y otros.

Los impactos negativos de manera temprana en la condición del pavimento, generan mayor frecuencia en las actividades de mantenimiento y en consecuencia mayores impactos ambientales por el uso de maquinaria pesada y de los materiales utilizados que también generan emisiones de dióxido de carbono.

Generalmente, la evaluación ambiental de la infraestructura del transporte vial se ha realizado considerando el impacto de la circulación de vehículos; sin embargo, la necesidad de reducir significativamente el impacto ambiental en las vías, hace que se planteen otras variables en la gestión de la conservación de las carreteras. En este contexto la *Southern African Development Community* (2003), plantea los siguientes aspectos de sostenibilidad: sociales, institucionales, económicos, financieros, ambientales, técnicos y políticos.

Torres Machí (2015), sostiene que el análisis integrado de los siete aspectos planteados por *Southern African Development Community* (2003) es muy complejo debido a sus características de distinta naturaleza y la importancia de cada aspecto varía según el ámbito de aplicación de la evaluación. En su investigación integra los aspectos técnicos, económicos y ambientales para darle un enfoque sostenible a la conservación de la infraestructura vial.

Plantear respuestas óptimas al problema de deterioros de pavimentos, en condiciones limitadas de presupuesto para las acciones de mantenimiento y la necesidad de proteger el medio ambiente, ha motivado a las administraciones de las infraestructuras viales la búsqueda de nuevas estrategias de gestión que integre modelos de evaluación, conservación y de priorización; en consecuencia, facilite la toma de decisiones oportunas, para definir adecuadamente los tramos o secciones de la vía que requieren atención prioritaria de mantenimiento, puntualizando el tipo de tratamiento y el periodo adecuado de aplicación.

1.2.4 Sistema de gestión de pavimentos

Un Sistema de Gestión de Pavimentos es un conjunto de métodos que facilitan a los tomadores de decisiones, identificar las estrategias idóneas para evaluar y mantener los pavimentos en condiciones de eficiencia durante un período de tiempo.

Manifiesta Pereira et al. (2019), que el concepto de gestión de pavimentos es útil para todo tipo de vías, y se constituye en una herramienta eficiente de apoyo a las administraciones del estado y a la empresa privada, por ser un sistema integral y conexo de actividades como: planeación, construcción, mantenimiento, evaluación e investigación.

En otras palabras, es un sistema estratégico que permite de manera eficiente la gestión integral del pavimento; con la finalidad de monitorear de forma continua su condición y tomar las decisiones idóneas para planificar el mantenimiento de la vía y mantener sus condiciones operativas de manera eficiente durante su vida útil. En la Figura 7, se muestra sus elementos: objetivos y políticas, base de datos (inventario), evaluación, predicción, tipos de mantenimiento, toma de decisiones, intervención y retroalimentación.

Figura 7

Sistema de Gestión de Pavimentos Flexibles



1.2.5 Componentes de un sistema de gestión de pavimentos

1.2.5.1 Objetivos y políticas

Las políticas y los objetivos definen las directrices del plan de mantenimiento. El correcto planteamiento y cumplimiento de estos aspectos conlleva a un sistema de conservación eficiente, en virtud de que se logra los objetivos de mantener la vía en condiciones de servicio aceptable para los usuarios, a menor costo de operación, fortaleciendo la seguridad vial y haciendo uso responsable de los recursos. Para el cumplimiento de estos objetivos se debe considerar condiciones sociales, económicas y políticas.

Z. Wu & Flintsch (2009), manifiesta que los objetivos reflejan las verdaderas preocupaciones de los planificadores de la infraestructura y se formulan en base a la disponibilidad de datos de apoyo y del grado de impacto económico y ambiental. Los objetivos más utilizados incluyen: la maximización del beneficio de conservación basado en la efectividad del tratamiento, maximización de la condición general de la red y minimización del costo de conservación. En resumen, los objetivos y políticas, utilizados en la gestión de infraestructura vial consideran maximizar el valor de la red o del proyecto vial a largo plazo, mediante acciones preventivas de mantenimiento y de menores impactos ambientales.

En el Anexo C, se expone los aportes de varios autores sobre la aplicación de objetivos y políticas, a partir de la contribución de Espinoza Valarezo (2018).

1.2.5.2 Creación de base de datos (inventario vial)

Para Kraemer et al. (2003), los inventarios de carreteras consisten en una recopilación ordenada de datos relacionados a sus elementos y características, debe ser fiable y actualizado, de tal manera que permita a los gestores consultar la información para elaborar una planificación en función de una adecuada e idónea tomar decisiones, que conlleve a una solución oportuna de los problemas, sin tener que desplazarse al campo para realizar las respectivas mediciones y comprobaciones; es una herramienta básica para la gestión de una red vial.

- *Inspecciones*

Para Kraemer et al. (2003), las inspecciones visuales y las auscultaciones realizadas con sensores y aparatos análogos de los elementos que conforman la vía, de manera particular el pavimento, permiten evaluar su estado y planificar su conservación y su rehabilitación. El monitoreo se debe realizar de forma periódica, para mantener actualizado el inventario; con el uso de la tecnología de la información se logra la actualización en tiempo real.

En este contexto varios autores proponen el uso de tecnología para la detección de los deterioros de la infraestructura; en el caso de los daños del pavimento, Macea-Mercado et al. (2016), utiliza un dispositivo electrónico adaptado a un vehículo, que permite tomar la información georreferenciada y generar mapas que se pueden presentar en las páginas *Web*. Díaz-Vilariño et al. (2016), usa datos *LiDAR* en el proceso de clasificación automática del deterioro del pavimento. Reyes-Ortiz et al. (2019), plantea la implementación de la técnica de inteligencia artificial. También, Pellicer Armiñana et al. (2020), expone la utilización de un sistema innovador de bajo costo a partir de redes neuronales convolucionales. La utilización de imágenes 2D ayuda a identificar y cuantificar los deterioros del pavimento, sistema de drenaje, marcas viales, señales verticales, y otros.

La utilización de softwares como *Collector* o *Field Maps* de *ArcGIS*, aplicaciones informáticas para los Smartphone, permiten tomar datos de los deterioros de los elementos de la carretera en tiempo real. Además, facilitan la creación y actualización de las bases de datos georreferenciados.

- *Inventario vial*

Según el Manual Vial; Volumen 6 del Ministerio de Transporte y Obras públicas (2012) un inventario vial se confecciona y actualiza, realizando operaciones rutinarias que tienen como finalidad identificar, evaluar y registrar los caminos que conforman la red vial de manera global y de cada uno de sus elementos. Los elementos deben ser evaluados estructural y funcionalmente. La información registrada debe ser completa y fidedigna.

En un sistema de gestión de mantenimiento de carreteras es prioritario mantener actualizada la información de cada uno de los elementos que conforman la vía, su ubicación y su estado, con la finalidad de facilitar la toma de decisiones presentes y futuras; en beneficio de la conservación de la carretera y del confort de los usuarios. La base de datos que se genera mediante el inventario puede alimentarse en tiempo real mediante el uso de aplicaciones informáticas, como el sistema de información geográfica.

Shah et al. (2014), expone que los datos del inventario incluyen los siguientes detalles: nombre y categoría de la vía, elementos geométricos de la carretera, tipo de pavimento, información histórica de la construcción y mantenimiento de la carretera, mediciones de tramos de pavimento, condición del firme. Además, se debe incluir el tipo de suelos, volumen de tráfico, condiciones climáticas, zonas vulnerables, señalización vertical y horizontal, vías de acceso, drenaje, y otros.

En el Anexo D, se expone los aportes de varios autores sobre la elaboración del inventario de vías como parte del plan de mantenimiento a nivel de proyecto, así como a nivel de red.

1.2.5.3 Base de datos (inventario)

Los parámetros a registrar en este inventario son: tipo de pavimento, espesores y tipo de material de la estructura del pavimento, cargas de tránsito, fallas superficiales, Índice de Condición del Pavimento (PCI), Índice de Regularidad Internacional (IRI), serviciabilidad de la vía (PSI) y solicitudes de tránsito vial (TPDA), entre otros.

Como estrategia de recolección de datos se realizan inspecciones visuales y registros de la condición de pavimentos, mediante el uso de tecnología e instrumentos como: formulario de reporte de daños, como el que se muestra en la Figura 8, presentado por la ASTM International (2007); aplicaciones móviles como Field Maps para ArcGIS; datos LiDAR para segmentar y clasificar el pavimento de manera automática, propuesto por Díaz-Vilariño et al. (2016); fotografías para una evaluación subjetiva planteado por Pereira et al. (2019), y otros.

Figura 8

Formato de Inspección Visual de Condición de Pavimento, Norma ASTM D 6433-07

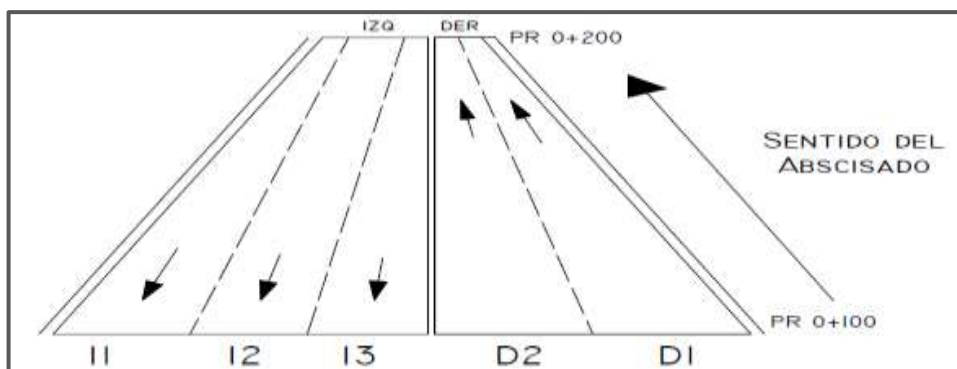
| ASPHALT SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT | | | | | | | | SKETCH: | | | |
|---|----------|----------------------------|--|----------------------------------|--|-------------------------|--|---------|-------|-----------|--------------|
| BRANCH _____ | | SECTION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

Fuente: (ASTM International, 2007).

Para organizar la información de daños es necesario registrar la posición del deterioro con respecto a la calzada; el Instituto Nacional de Vías (2006), sugiere enumerar los carriles, como se muestra en la Figura 9. Sin embargo, se puede adoptar otras formas de codificar la toma y registro de la información, según el criterio de las administraciones gubernamentales.

Figura 9

Numeración de Carriles para Vías de una sola Calzada



Nota: D1: derecho externo, D2: derecho interno, I1: izquierdo externo, I2: izquierdo central, I3: izquierdo interno. Fuente: (Instituto Nacional de Vías, 2006).

1.2.5.4 Evaluación del pavimento

La evaluación del pavimento es un proceso que permite realizar un diagnóstico de la condición de este elemento vial. El monitoreo del estado del pavimento se debe realizar de manera sistemática y permanente, con la finalidad de detectar los deterioros oportunamente. Según Hirooka Koshigoe et al. (2019), los factores que contribuyen en el deterioro del pavimento son: parámetros de diseño, la calidad de materiales utilizados, los agentes ambientales, el volumen de tráfico y la tasa de crecimiento de los vehículos.

Además, se debe controlar la eficiencia de los sistemas de drenaje, las fallas geológicas del área donde se ubica la vía, las zonas de inundación, y las zonas de riesgo sísmico. Igualmente se debe revisar la existencia de planes de conservación y mantenimiento; así como analizar su pertinencia y eficiencia.

En el proceso de evaluación se analiza la condición estructural y funcional del pavimento: la evaluación de la condición estructural permite determinar la capacidad portante de las capas que componen el pavimento, en este análisis se considera la deflexión y los espesores de las capas; en la evaluación de la condición funcional se estudian: la regularidad superficial, retroreflexión, deterioros superficiales, el rozamiento y textura.

Existen diferentes metodologías de evaluación de pavimentos entre ellos están: VIZIR, PASER, IRI, CRT, PSI, PCI, y otros. Las metodologías no presentan los mismos procesos, algunas se basan en la inspección visual de la estructura del pavimento y otras requieren de equipos específicos de medición. En esta investigación se revisa la metodología del Índice de Condición del Pavimento (PCI), que según Vásquez (2002), evalúa objetivamente al pavimento y no requiere de instrumentos especializados.

- *Índice de condición del pavimento (PCI)*

En las estructuras de pavimento se presentan deterioros debido a la acción de las cargas de tráfico, condiciones geológicas, hidrológicas, climatológicas, y otros aspectos. Estos deterioros se clasifican de acuerdo a su clase, severidad y cantidad; plantear una formulación matemática es muy complejo si se considera el gran número de posibles

condiciones. Vásquez (2002), indica que para facilitar la evaluación del pavimento se introdujeron los “valores deducidos” como un modelo de factor de ponderación, para indicar el nivel de afectación que cada combinación de los indicadores tiene sobre la condición del pavimento.

Los valores del PCI varían desde cero (0), en el caso de un pavimento en condiciones de colapso de la estructura; hasta cien (100), para un pavimento en excelente estado. En la Figura 10, se muestra los rangos de PCI, su descripción cualitativa y el código de color, adaptado de la Norma ASTM D6433-07 titulada *Standard Practice for Road and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys*. El índice de condición de pavimento se fundamenta en los resultados del inventario visual, en donde se establece la clase o tipo, nivel de severidad y cantidad de cada deterioro.

Figura 10

Rangos de Calificación del índice de condición del pavimento (PCI)



Fuente: Adaptado de ASTM International (2007).

- *Deterioro de pavimentos flexible*

Los pavimentos o firmes sufren deterioros por acción de las cargas generadas por el tránsito y por las condiciones ambientales a las que está expuesto durante su vida útil. Como manifiesta Valdés Vidal et al. (2012), las cargas de tránsito tienen mayor incidencia en la determinación o predicción del deterioro del pavimento en un periodo dado. Al mismo tiempo los factores ambientales como la temperatura y la humedad inciden en el comportamiento mecánico del pavimento: la temperatura afecta directamente a la rigidez y en los estados tensionales del pavimento y la humedad influye en la adhesividad entre los materiales de la capa asfáltica, lo que puede generar fallas estructurales por infiltración de agua a las capas inferiores.

También causan deterioro al pavimento, factores como: calidad de materiales utilizados en su construcción, malas prácticas constructivas, deficientes planes de mantenimiento y falta de políticas de mantenimiento.

- *Tipos de deterioro de pavimentos flexible*

Los deterioros de pavimentos flexibles se pueden clasificar por su origen, los mismos que pueden ser deterioros estructurales y deterioros superficiales. En el primer caso las fallas se presentan en una o varias capas de la estructura del pavimento, se evidencia con la aparición de grietas superficiales y profundas; mientras que los daños superficiales son deformaciones que según Bañón Blázquez & Bevía García (2000), afectan la geometría de la capa de rodadura de la vía.

Para determinar los deterioros de pavimento flexible se utiliza como guía un conjunto de fallas que propone el Método *Pavement Condition Index (PCI)*, registrados en la Norma ASTM D6433-07 que se resume en el Anexo E.

- *Procedimiento de evaluación del pavimento*

De acuerdo con Vásquez (2002), la evaluación de una red vial puede tener un número muy grande de unidades a evaluar, por lo cual las inspecciones visuales demandarán muchos recursos, en consecuencia se debe aplicar el proceso de muestreo. En el caso de la evaluación de un proyecto se debe realizar las inspecciones en todas las unidades; si no se puede realizar la evaluación en todos los tramos también se debe establecer unidades de muestra.

- *Unidades de muestreo*

Se divide la vía en secciones, cuyas dimensiones varían de acuerdo al tipo de carretera y de la capa de rodadura. Según la Dirección General de Carreteras de España (2003), se debe establecer tramos homogéneos en: número de carriles por calzada, sección estructural, fecha de la última intervención de tipo estructural, categoría de tráfico pesado y comportamiento uniforme; basado en inspección visual, en auscultaciones con equipos

de medida y estudios de laboratorio. Para determinar el número mínimo de unidades a evaluar, la ASTM International (2007), propone la siguiente ecuación.

$$n = \frac{N * \sigma^2}{\frac{e^2}{4} * (N-1) + \sigma^2} \quad (1)$$

Donde:

n: número mínimo de unidades de muestreo a evaluar

N: número total de unidades de muestreo de la sección de pavimento

e: Error admisible en el estimativo del PCI de la sección ($e = \pm 5$ Puntos de PCI)

σ : desviación estándar del PCI entre unidades

Inicialmente se asumen la desviación estándar del PCI de 10 para pavimento flexible, en las siguientes inspecciones se usará la desviación estándar real (o el rango PCI) de las inspecciones previas a determinar el mínimo de unidades a evaluar. Se deben evaluar todas las unidades en el caso de $n > 5$. La primera unidad a evaluar se elige al azar. En la selección de intervalos se utiliza la siguiente ecuación:

$$i = \frac{N}{n} \quad (2)$$

Donde:

N = número total de unidades de muestreo disponible

n = número mínimo de unidades a evaluar

i = intervalo de muestreo, se redondea al número entero inferior

En el Anexo F, se expone los aportes de varios autores sobre el proceso de evaluación del pavimento de vías, como parte del plan de mantenimiento a nivel de proyecto, así como a nivel de red.

1.2.5.5 Predicción de la Condición de Pavimento Flexible

Predecir el estado y evolución de los elementos de una vía de forma fiable, garantiza una programación de actividades idóneas, a largo plazo y a menor costo. Los modelos de

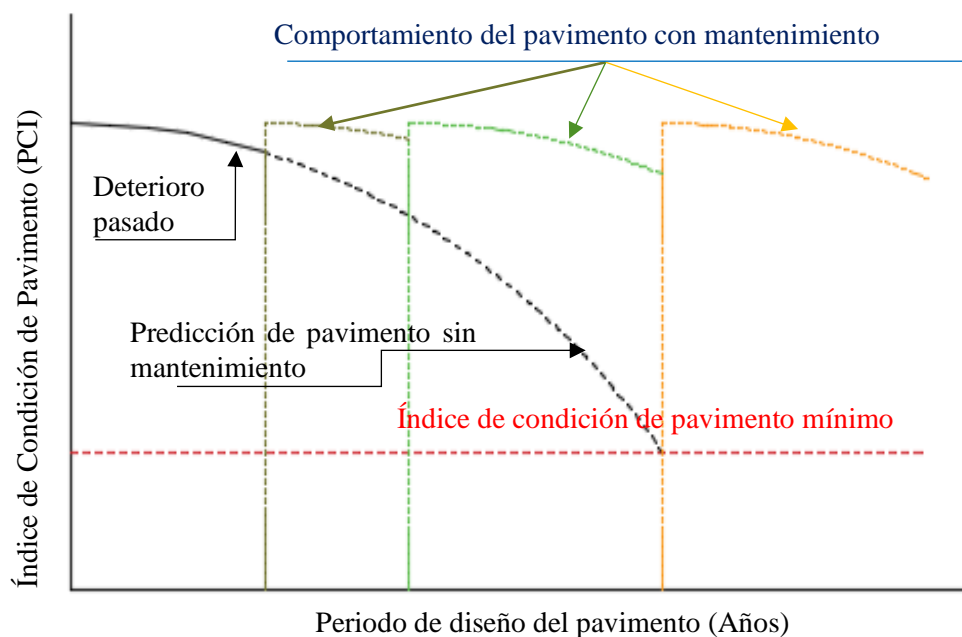
predicción buscan obtener resultados muy cercanos a la realidad, mediante el uso de procesos matemáticos y herramientas tecnológicas avanzadas.

Realizar un modelo de predicción del estado del pavimento requiere del análisis de variables que según Llopis-castell et al. (2020), son: la antigüedad del pavimento; los deterioros de cada segmento del pavimento, medido por el PCI; la capacidad estructural, medida por su número estructural (SN); el tráfico, que incluye los factores de tráfico promedio diario anual de vehículos (TPDA), así como la carga equivalente de eje único (ESAL); y los factores climáticos durante la edad del pavimento.

En resumen, los modelos de predicción de la condición del pavimento se realizan en función de los factores como: la edad de la infraestructura, el PCI, la intensidad de tráfico, el medio ambiente, el diseño, la calidad de materiales y las metodologías constructivas. En la Figura 11, se muestra la representación gráfica de estos modelos que recibe el nombre de curvas de comportamiento.

Figura 11

Comportamiento de la Condición del Pavimento sin y con Mantenimiento



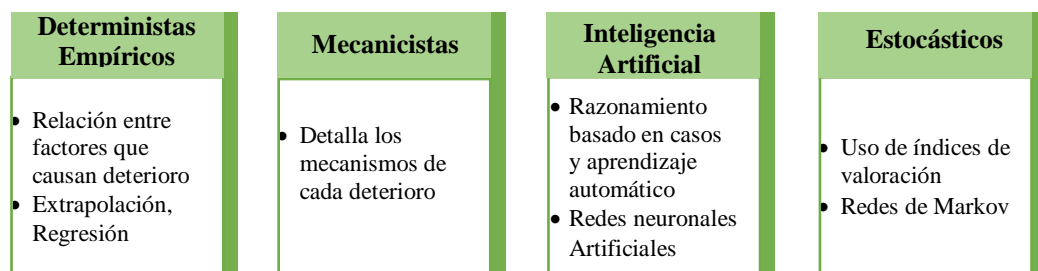
Fuente: Adaptado de Menéndez (2003) y Torres Machí (2015).

Estos modelos permiten estimaciones de los efectos de las diferentes actuaciones de mantenimiento, el nivel de deterioro generado por estas actuaciones y su desarrollo en el tiempo. Para Neves y Fragopol (como se citó en Torres Machí, 2015), los modelos de comportamiento consideran que la aplicación de tratamiento produce efectos como: aumento puntual de PCI; detiene el deterioro y reduce la velocidad del daño durante un intervalo de tiempo posterior a la aplicación.

Para Pellicer Armiñana et al. (2020), predecir la condición futura del pavimento tiene como finalidad programar de forma eficiente a corto y largo plazo, el presupuesto y las actividades adecuadas para el mantenimiento vial. En consecuencia, se disminuye los costos de mantenimiento y se mantiene las mismas características funcionales y estructurales durante el periodo de diseño de la vía. Martínez Cañamares (2016), sostiene que en una correcta gestión del mantenimiento se puede utilizar los modelos de deterioro, mostrados en la Figura 12.

Figura 12

Tipos de Modelo de Predicción de Deterioros de una Infraestructura Vial



Fuente: Adaptado de Martínez Cañamares (2016).

George et al. (1989), clasifica los modelos predictivos en determinísticos y probabilísticos. Los modelos determinísticos incluyen respuesta primaria, rendimiento estructural, rendimiento funcional y modelos de daño. Todos ellos pueden ser de carácter empírico, lo que implica regresiones numéricas o correlaciones del tipo mecánico-empíricas. En cuanto a los modelos probabilísticos se incluyen las cadenas de Markov.

A continuación se describe los modelos de predicción propuestos por Picado Muñoz (2016), Modelo de Wu (2015) y George et al. (1989).

- *Modelo Picado Muñoz (2016)*

El modelo se realizó a partir de la revisión de 188 caminos en las provincias de San José, Alajuela, Cartago y Heredia en Costa Rica. La evaluación de la condición del pavimento es de acuerdo a la norma ASTM D6433. El modelo propone la relación del PCI en el tiempo y se considera además un factor de incertidumbre que puede variar en función de la importancia del camino, es decir, si una vía es de mayor importancia, se puede emplear un factor de incertidumbre mayor. Las curvas de comportamiento se construyeron a partir de un análisis multivariable utilizando el software PAST. La expresión matemática es:

$$PCI(t) = -0.2181t^2 - 2.2359t + 100 + 6.4386Z_o \quad (3)$$

Donde:

PCI(t) = *Pavement Condition Index* (PCI).

t = tiempo, año de vida del pavimento.

Z_o = valor en función del nivel de incertidumbre, tomando los valores de la Tabla 1.

Tabla 1

Valores de Z_o en Función del Nivel de Incertidumbre

| Incertidumbre (%) | Z_o |
|--------------------------|----------------------|
| 99 | -2.57583 |
| 95 | -1.95996 |
| 90 | -1.64485 |
| 85 | -1.43953 |
| 80 | -1.25155 |
| 75 | -1.15035 |

Fuente: Picado Muñoz (Picado Muñoz, 2016)

- *Modelo de Wu (2015)*

El Modelo es realizado a partir de los datos históricos de 42 secciones viales de la red estatal del estado de Minnesota, que forman parte de la base de datos del programa *Long-Term Pavement Performance (LTPP)* y del proyecto “*Minnesota Road Research*” (Mn/ROAD). Esta red vial recibe un tráfico pesado menor a 5000. El umbral de PCI para

el mal estado es de 55, de acuerdo con la norma ASTM D 6433-07. La vida útil del pavimento es de 16.5 años antes de que se realice una rehabilitación o reconstrucción. El modelo fue desarrollado relacionando la condición del pavimento flexible con el tiempo y se expresa en la siguiente relación:

$$PCI = 11.52 + \frac{88.86}{1 + \exp(0.33t - 5.45)} \quad (4)$$

La relación es lineal con una precisión de $R^2 = 0.9926$

- *Modelo de George et al. (1989)*

Es de tipo mecánico-empírico, plantea la ecuación basada en la edad del pavimento, el volumen y el peso del tráfico expresados en términos de cargas equivalentes (ESAL), que según la AASHTO define como eje equivalente que distribuye en dos ruedas la carga de 8.2 toneladas o 80 Kilonewtons. Además, la composición estructural del pavimento descrito por el número estructural modificado (SNC), que los autores consideran a esta variable en el rango de 2.5 a 7.47 cuando se trata de pavimentos flexibles no intervenidos y 1.1 a 8.2 para los firmes flexibles que han sido intervenidos. La ecuación propuesta es la siguiente:

$$PCI(t) = 90 - a[\exp(t^b) - 1] \log\left[\frac{ESAL}{SNC^c}\right] \quad (5)$$

Donde:

PCI = *Pavement Condition Index*

t = edad de pavimento en años

ESAL = Número de ejes equivalentes

SNC = número estructural modificado

Para pavimentos flexibles no intervenidos, los coeficientes de regresión utilizados a, b, y c toman los siguientes valores: $a = 0.6349$; $b = 0.4203$; $c = 2.7062$; $R^2 = 0.75$.

La ecuación representa un modelo con mejor ajuste para la predicción de la condición de pavimento flexible sin superposición. En las Figura 13 y 14, se muestran los valores de

las variables y coeficientes de la ecuación del modelo de predicción de la condición del pavimento flexible.

Figura 13

Rangos de Valores de los Principales Parámetros Basados en Datos Empíricos

| Parameter | Range of Each Parameter, Flexible Pavement | | |
|--|--|---------------|--------------------|
| | No Overlay | Overlay | Composite Pavement |
| Number of data points | 54 | 193 | 135 |
| Thickness of AC surface, inches (<i>T</i>) | NA | 1.0–8.0 | 2.0–5.0 |
| Modified structural number (<i>SNC</i>) | 2.5–7.7 | 1.1–8.2 | NA |
| Yearly equivalent single axle load (<i>ESAL</i>) | 1,055–104,965 | 1,191–809,289 | 4,331–119,696 |
| Age since construction or last overlay, years | 1–16 | 1–10 | 1–10 |
| Pavement condition rating (<i>PCR</i>) | 59–89 | 62–89 | 52–89 |
| Year of <i>PCR</i> survey | 1986–1988 | 1986–1988 | 1986–1988 |

Fuente: George et al. (1989)

Figura 14

Parámetros Estadísticos de los Modelos Predictivos de Condición del Pavimento

| Type of Pavement | Regression Coefficient | Standard Error of estimate, % | R ² |
|-------------------|------------------------|-------------------------------|----------------|
| Flexible Original | a = 0.6349 | 17.1 | 0.75 |
| | b = 0.4203 | 5.6 | |
| | c = 2.7062 | 21.4 | |
| Flexible Overlay | a = 0.8122 | 7.4 | 0.76 |
| | b = 0.3390 | 3.2 | |
| | c = 0.8082 | 38.8 | |
| Composite | a = 1.7661 | 3.0 | 0.69 |
| | b = 0.2826 | 6.0 | |

Fuente: George et al.(1989)

En el Anexo G, se expone los aportes de varios autores sobre modelos de predicción de pavimentos de vías, como parte del plan de mantenimiento a nivel de proyecto, así como a nivel de red.

1.2.5.6 Estrategias de Intervención en el Mantenimiento de las Vías

Son acciones que utiliza el organismo administrador de una red vial o de un proyecto vial, para conservar las funciones operativas de las carreteras, durante su vida útil. El Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (2013), clasifica a las actuaciones de las infraestructuras en:

- a) Las de prevención que está orientadas al mantenimiento y conservación de las cualidades iniciales de la infraestructura. Se dan acciones rutinarias y periódicas
- b) Las que buscan una mejora de las cualidades iniciales de la Infraestructura.

En este mismo contexto Pastor (2020), expone que el mantenimiento se puede agrupar en función del momento de la intervención: mantenimiento preventivo y correctivo.

- *El mantenimiento preventivo*

Se realiza con el propósito de mantener el nivel de servicio o eficiencia de la carretera; requiere de una programación de intervención anticipada y sistemática. Este tipo de mantenimiento puede darse de dos formas:

- a) Mantenimiento preventivo programado: este tipo de mantenimiento se planifica y presupuesta con antelación, basado en datos históricos, análisis de investigadores y en las condiciones de uso de la vía, durante su periodo de diseño. En un determinado momento de la vida útil de la vía se evalúa la condición del pavimento y se programa las acciones de mantenimiento adecuadas para evitar el deterioro progresivo.
- b) Mantenimiento preventivo predictivo: este mantenimiento hace uso de las tecnologías, de los conceptos matemáticos, así como del análisis de las variables físicas como volumen y composición de tráfico, temperatura, humedad, edad del

pavimento, entre otras; para desarrollar modelos de predicción de la condición de la vía; de esta manera se estima el momento idóneo para realizar las acciones de mantenimiento.

- *Mantenimiento correctivo*

En palabras de Pastor (2020), este mantenimiento arregla las fallas o avería del activo vial una vez que son observadas. Este tipo de mantenimiento no requiere de información del comportamiento del activo, debido a que la actuación se realiza después de aparecer el deterioro, esto hace que los costos de mantenimiento sean elevados.

Las estrategias de intervención también se las conoce como niveles de intervención. Para Menéndez (2003), estas acciones se clasifican por la magnitud de los trabajos, desde una actividad sencilla y rutinaria hasta una intervención costosa y complicada. El autor expone los siguientes tipos de mantenimiento: rutinario, periódico, rehabilitación, mejoramiento y reparaciones de emergencia.

- *Mantenimiento Rutinario.*

“Actividades destinadas a reparar o reponer situaciones de deterioro que se producen en la carretera y en sus elementos conexos a lo largo del año y que, en cierta medida, son independientes de la intensidad del tránsito y de las condiciones meteorológicas” (Ministerio de Transporte Colombia, 2016). Por lo tanto, este tipo de mantenimiento es correctivo, se da después de la aparición del deterioro. Para Menéndez (2003), el mantenimiento rutinario se realiza para corregir pequeños deterioros de los elementos de la vía; así como, para controlar el polvo, limpieza de los sistemas de drenaje, calzada, pequeños derrumbes, control de vegetación, señalización, pintura de puentes, y otros. Se aplica una o más veces al año, dependiendo de las características de la vía y de las condiciones climáticas de la zona.

- *Mantenimiento periódico*

Menéndez (2003), sostiene que este tipo de mantenimiento se aplica para restablecer algunas de las características de la capa de rodadura, sin incluir un refuerzo estructural. Además estas acciones, de acuerdo con Ministerio de Transporte Colombia (2016), son aplicadas a la señalización, reparación de obras de arte y de sistemas de drenaje. Estrada Fernández y Sáez Villar (2016), manifiestan que la intervención debe programarse para ser realizadas sistemáticamente en periodos mayores a cinco años. Como medida para detener el incremento del deterioro del pavimento flexible se aplica lechadas asfálticas y sellos superficiales; la reparación puede ser de manera parcial o total.

- *Rehabilitación*

En palabras de Menéndez (2003), la rehabilitación consiste en restaurar la capacidad estructural de la capa de rodadura y de mejorar el sistema de drenaje. En el caso de la reparación del firme se realiza una demolición parcial de su estructura. Este tipo de intervención procede en el caso de deterioro de la vía generados por el incremento de las cargas vehiculares, por una inadecuada metodología constructiva, o por un deficiente plan de mantenimiento. El autor sugiere que se aplique en situaciones emergentes.

- *Mejoramiento*

Menéndez (2003), explica que un mejoramiento de las vías está relacionado con los elementos geométricos y con la rehabilitación de la estructura del pavimento. Su objetivo es incrementar la capacidad operativa de la carretera, en términos de velocidad, seguridad. Generalmente estos trabajos no se consideran parte de la conservación de caminos, con excepción de la renovación de la superficie.

- *Reparación de emergencia*

Lo expuesto por Menéndez (2003), en relación a las acciones emergentes, estas se dan por un mantenimiento deficiente prolongado, desastres naturales, por insuficiencia de recursos para la reconstrucción o rehabilitación. Estas reparaciones no resuelven el

problema estructural del firme, sin embargo; habilita la vía para la circulación vehicular por un tiempo limitado.

- *Estrategias de Intervención en función del índice de condición del pavimento.*

El Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (2013) y ASTM International (2007), exponen las diferentes opciones de reparación, según el tipo de deterioro y su nivel de severidad; estas recomendaciones se muestran en el Anexo H.

En la Figura 15, se expone las categorías de mantenimiento en función de los rangos de PCI una breve descripción de las intervenciones a realizar.

Figura 15

Índice de la Condición del Pavimento y Categoría de Mantenimiento

| Excelente 100-85 | Muy Bueno 85-70 | Bueno 70-55 | Regular 55-40 | Malo 40-25 |
|--|--|---|---|---|
| Preventivo | Correctivo Menor | Correctivo Mayor | Rehabilitación Menor | Rehabilitación Mayor |
| En ocasiones se hace tratamientos preventivos de mantenimiento | Pavimento en condición buena, con fallas iniciales, requieren acciones correctivas inmediatas y/o en el corto plazo. (sellado de grietas, bacheo, sellado asfáltico localizado, nivelación localizada, fresado y texturización localizada) | Se requieren acciones correctivas frecuentes y seguramente una rehabilitación a mediano plazo (sellado de superficie, re-encarpetado delgado, tratamiento de superficies, capas asfálticas de nivelación, de fricción y/o sellado, estructurales, remoción por fresado, reciclado en frío, reciclado en caliente) | Condición deficiente con fallas en proceso de generación, que requieren una rehabilitación en corto plazo para evitar daños irreversibles | Condición muy deficiente, con fallas severas generalizadas que requieren una rehabilitación mayor, probablemente con alto porcentaje de reconstrucción en corto plazo |

Fuente: Adaptado de Sotil Chávez, (2014) y en la Norma ASTM D 6433-07

- *Tipos de tratamiento en pavimentos flexibles*

Para mantenimiento preventivo se puede aplicar *Slurry*, micropavimentos, *chip seal*, y otros materiales para niveles de PCI mayores a 80. Estas mezclas están compuestas de agregados, emulsión asfáltica, agua, relleno mineral y otros aditivos; se colocan uniformemente sobre una superficie previamente preparada. Se utilizan para evitar el desgaste del camino; sus costes son menores que la mezcla en caliente, no es necesario fresar, su colocación es fácil y rápida, no suelta polvo y tiene menor impacto ambiental. En el Anexo I, se expone las características de estos tratamientos según lo detalla la Norma A143 del *International Slurry Surfacing Association* (2010).

Para mantenimiento correctivo, se considera hacer recapado o recrecimiento, que se aplica para reponer la capa de rodadura mediante una mezcla asfáltica en caliente. En palabras de Torres Machí (2015), es necesario aplicar un fresado previo para recortar y eliminar el espesor del pavimento, dejando una superficie texturizada que sirve de base para el recrecido garantizando el nivel que la calzada tenía antes del tratamiento. Además se puede utilizar reciclado en frío, que es una técnica que permite transformar el pavimento degradado en una estructura con calidad y capacidad homogénea, que pueda soportar cargas como al inicio de su construcción.

El material reciclado obtenido durante el proceso de fresado de la carpeta asfáltica existente, requiere de ensayos de laboratorio que determinen las propiedades físicas y mecánicas. Se puede reciclar *in situ* o en planta.

La rehabilitación de pavimentos flexibles con material reciclado en frío y emulsión asfáltica, se considera un proceso sostenible que aporta a la carretera una resistencia mecánica gradual, un buen comportamiento a la fatiga, mayor rapidez en la ejecución de los trabajos, ahorro económico, eficiencia energética y menor afectación ambiental

En el Anexo J, se expone los aportes de varios autores sobre las diferentes estrategias de mantenimiento de pavimentos, a partir de un análisis de los deterioros y de la determinación del PCI. Estas acciones propuestas utilizan tratamientos preventivos y correctivos, de menor costo y bajos niveles de emisiones de CO₂.

1.2.5.7 Toma de decisiones en la gestión de pavimentos

La toma de decisiones en un sistema de gestión de pavimentos, es un proceso que da la oportunidad de optimizar recursos, en función del análisis de la mejor alternativa de intervención, de acuerdo a criterios sociales, ambientales, económicos, políticos, integrados a los criterios técnicos; de manera que ayuden en la conservación o mejoramiento de las condiciones operativas de la infraestructura vial. La complejidad de este proceso requiere de un equipo de técnicos especialistas que conocen el comportamiento de los elementos; así como, las consecuencias de las decisiones tomadas.

Para Meneses & Ferreira (2012), la toma de decisiones es la herramienta principal del Sistema de Gestión de Pavimentos, se utiliza para la selectividad de la mejor propuesta de mantenimiento, considerando el comportamiento esperado en la calidad del elemento.

En palabras de Santos et al. (2020), se formula en términos de un conjunto de funciones objetivo que deben maximizarse y/o minimizarse y un conjunto de restricciones que deben satisfacerse. Es decir, la optimización en el mantenimiento de las infraestructuras plantea funciones que maximice los beneficios mediante la intervención propuesta y minimice los aspectos negativos que puedan incidir en la gestión de la vía; haciendo uso responsable de los recursos disponibles.

Los criterios de decisión de cómo distribuir los recursos de manera eficiente se realizaba mediante métodos manuales en el marco de conocimientos de ingeniería; a medida que se introducen procesos automáticos en el análisis de variables, se obtiene una serie de parámetros que permiten priorizar las acciones y en consecuencia optimizar los recursos inherentes al mantenimiento de las vías.

En palabras de Mysiak et al. (2005), los sistemas de apoyo a la toma de decisiones se han desarrollado desde la década de 1970 para ayudar a abordar los problemas de decisión semiestructurados y no estructurados. En este sentido, estos sistemas de apoyo son métodos de toma de decisiones para cada tipo de problema: los estructurados que requieren de sencillas operaciones matemáticas; así como, los no estructurados donde no

existen una solución única. Existen diversos métodos, técnicas o enfoques que son utilizados en la toma de decisiones, basados en el análisis de criterios múltiples.

Varios autores proponen modelos de toma de decisión, entre ellos tenemos: el modelo Tavakoli et al. (1992), que determina un índice de prioridad en función de la condición del pavimento, el tipo de vía, las solicitudes de tráfico y las acciones de mantenimiento; el método del índice de condición del pavimento (MPI) aplicado por Shah et al. (2014), que prioriza el tramo de pavimento basado en los deterioros, el tráfico y el drenaje; la propuesta de Torres Machí (2015), que consiste en un algoritmo de optimización heurística que integra criterios económicos, técnicos y ambientales; el modelo de Santos et al. (2020), que selecciona un ciclo de vida óptimo y sostenible aplicando lógica difusa; el modelo de Pellicer Armiñana et al. (2020), es un sistema integral que propone un proceso de optimización considerando las condiciones presupuestarias, sociales y ambientales; el *Highway Development and Management* (HDM-4), desarrollado por el Banco Mundial, evalúa la condición económica de la conservación vial; entre otros.

En el Anexo K, se presenta aportes de expertos en el área de mantenimiento de pavimentos, particularmente sobre la toma de decisiones oportunas e idóneas para la conservación de las vías.

- *Método Tavakoli*

El método empírico desarrollado por Tavakoli et al. (1992), determina el índice de prioridad (IP) en función del índice de condición del pavimento (PCI), clase de vía, volumen y clasificación de tráfico, factor de tráfico, y mantenimiento del pavimento. Además de comparar, priorizar y asignar recursos a diferentes alternativas de mantenimiento, tiene como objetivo la optimización de los recursos, para garantizar la calidad de los trabajos. El índice de prioridad es calculado con la siguiente ecuación:

$$PI = \frac{1}{PCI} * TF * FC * TR * MF \quad (6)$$

Donde:

PI = índice de prioridad

PCI = índice de condición del pavimento flexible evaluado

TF = Factor de tráfico

FC = Factor de clasificación funcional

TR = Factor de ruta

MF = Factor de mantenimiento que depende de los índices de mantenimiento. El Índice de mantenimiento varía de 0 a 5, dependiendo del tipo de intervención.

En la Tabla 2, se registran los valores de varios parámetros utilizados en el cálculo del índice de prioridad del modelo Tavakoli.

Con respecto a la escala de los resultados (IP) obtenidos, varía de cero a uno; siendo cero para situaciones donde no se requieren intervenciones inmediatas en el pavimento y de uno o mayor que uno, para aquellas secciones donde las intervenciones deben priorizarse.

Tabla 2

Factores de Cálculo del Índice de Prioridades en Intervención de Vías

| Factor | Rangos |
|--|---|
| <i>Pavement condition index</i> (PCI) | PCI = 100 – total de puntos de defectos |
| Factor de Tráfico (TF) | Tráfico Diario Medio (TDM) TF = 10, TMD: 0 - 99; TF = 20, TMD: 100-499; TF = 30, TMD: 500-999; TF = 40, TMD: 1000-1999; TF = 50, TMD: 2000-4999; TF = 100, TMD: > = 5.000 |
| Factor de clasificación funcional (FC) | Arterial = 1.2 Colectora = 1.1 Local = 1.0 |
| Factor de Ruta (TR) | Para tránsito = 1.0 Para centros educativos = 1.1 |
| Factor de Mantenimiento (MF) | $MF = 1 + \frac{\text{índice de mantenimiento}}{10}$ (7) |
| Índice de Mantenimiento | 1A = 0, No hacer nada A = 1, Mantenimiento Rutinario B = 2, Mantenimiento Preventivo C = 3, Acciones emergentes D = 4, Rehabilitación E = 5, Reconstrucción |

Fuente: Adaptado de Tavakoli et al. (1992).

- *Método de Análisis Multicriterio*

Esta herramienta facilita la optimización de un sistema de gestión de pavimento, considerando aspectos técnicos, económicos y ambientales durante su ciclo de vida. Tiene como objetivo la asignación óptima y sostenible de recursos disponibles para el mantenimiento de la vía.

Salviatto et al., (2021), sostiene que el *Multi-criteria Decision Analysis* (MCDA) tiene como objetivo seleccionar la mejor alternativa en la solución de un problema, mediante el análisis de todos los datos relacionados a este. Su estructura consta de tres fases: estructuración, evaluación y recomendaciones. En la fase de estructuración se establece un orden de los elementos importantes para el decisor. Durante la evaluación se realiza una comparativa de los elementos y se hacen escalas cardinales que representan las preferencias locales y globales. En la fase de recomendaciones se analiza las consecuencias de las decisiones tomadas.

Desde el punto de vista de Wu y Flintsch (como se citó en Torres Machí 2015), una gestión sostenible de infraestructura vial tiene como propósito alcanzar múltiples objetivos: minimizar costos e impactos ambientales, maximizar la condición de la vía, y otros; sin embargo estos objetivos suelen estar en conflicto, lo que hace difícil mejorar uno de ellos sin que se dé un impacto negativo en los demás, esto genera un problema en el área de la decisión multicriterio.

Zavadskas et al. (2014), señala que los métodos de toma de decisiones multicriterio (*Multiple-Criteria Decision Making*, MCDM) cubren una diversa gama de enfoques. Estos métodos pueden clasificarse en dos categorías: La toma de decisiones multiatributo (MADM, *Multi-Attribute Decision Making*) y la toma de decisiones multiobjetivo (MODM, *Multi-Objective Decision Making*) que da solución a problemas continuos.

MADM: resuelve problemas discretos donde el número de alternativas y criterios es finito. Las decisiones se toman al inicio, asignando pesos a los criterios que se van a evaluar. Como resultado se obtienen un proceso de priorización de las alternativas de solución al problema planteado.

MODM: da solución a problemas continuos; con respecto a varios criterios, este conjunto de soluciones se denomina “frontera de Pareto”. Las decisiones se toman al final, escogiendo la solución de entre las existentes en la frontera de Pareto.

En este trabajo se aborda la toma de decisiones MADM, con la finalidad de establecer criterios en la etapa inicial del proceso de optimización de actuación en la vía; y obtener una puntuación de cada sección de la carretera evaluada que defina un orden de prioridad en las acciones de mantenimiento. Según Hajkowicz & Collins (2007), se pueden utilizar varios métodos para la toma de decisiones, entre ellos proponen: ANP, AHP y MACBET, Comparación de pares, útil para determinar pesos de criterios y evaluar aquellos con carácter subjetivo comparando alternativas entre sí.

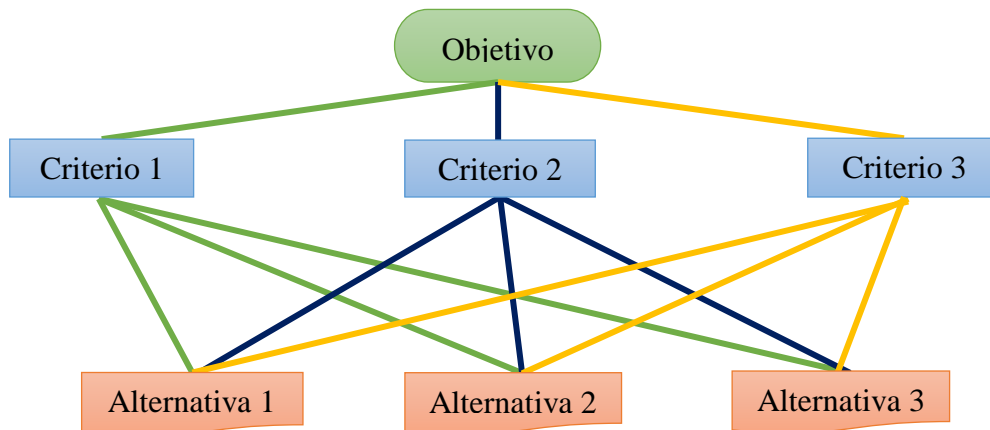
- *Proceso de análisis jerárquico (AHP), Saaty (1987)*

Saaty (1987), describe el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) como método de medición, que puede utilizarse para establecer medidas tanto en el dominios físicos y sociales. Se usa para modelar un problema mediante una estructura jerárquica o de red y comparar por pares para establecer relaciones dentro de la estructura. Este modelo de toma de decisiones es una técnica multicriterio sencilla de aplicar, debido a que permite descomponer un problema complejo en elementos simples.

En la Figura 16, se describe los niveles del proceso del AHP, siendo el punto inicial de la jerarquización el objetivo a lograr; el segundo nivel corresponde a criterios requeridos para el cumplimiento del objetivo; en el caso de ser necesario se plantea un tercer nivel que corresponde a los subcriterios y finalmente se ubica el nivel de las alternativas a considerar. Los elementos de cada nivel o jerarquía se consideran restricciones, descomposiciones o refinamientos de los elementos anteriores. Las líneas indican las relaciones entre los componentes del esquema jerárquico.

Figura 16

Sistema de Análisis Jerárquico (AHP)



Como parte del proceso AHP, se construye una matriz de cotejo de los criterios, considerando la escala de comparación de alternativas pareadas que se muestran en la Tabla 3. Este método es utilizado en solución de conflictos, optimizaciones de recursos, selección de alternativas, así como en la planificación de proyectos.

Tabla 3

Escala Fundamental de Comparaciones de Alternativas Pareadas

| Intensidad | Definición | Explicación |
|------------|-------------------------|---|
| 1 | Igual | Las dos alternativas contribuyen de igual forma al cumplimiento del criterio |
| 3 | Moderada | Una alternativa quizá contribuye levemente más que la otra alternativa al cumplimiento de un criterio |
| 5 | Fuerte | Una alternativa contribuye fuertemente en el cumplimiento de un criterio respecto a la otra alternativa |
| 7 | Muy fuerte o demostrada | Una alternativa contribuye definitivamente al cumplimiento de un criterio respecto a la otra alternativa; su predominancia se ha demostrado en la práctica. |
| 9 | Extrema | Una alternativa es absoluta y claramente preferida para el cumplimiento de un criterio respecto a la otra alternativa |
| 2,4,6,8 | Valores intermedios | Grados intermedios que necesitan un compromiso de las partes |

Fuente: Saaty (1987)

- *Criterios utilizados para la toma de decisiones*

El proceso de toma de decisiones requiere del análisis, síntesis y evaluación de varios aspectos relacionados al problema planteado; en el caso de sistemas de gestión de infraestructura vial, Torres Machí (2015), propone criterios técnicos, económicos y ambientales. Asimismo, Pellicer Armiñana et al. (2020), integra a su modelo los criterios antes mencionados e incluye el aspecto social. En la Tabla 4, se muestra diferentes criterios propuestos por varios autores, que pueden ser utilizados por el tomador de decisiones, durante el proceso de la gestión del mantenimiento vial.

Tabla 4

Criterios del Proceso de Optimización de Estrategias de Mantenimiento

| Criterio | Subcriterio |
|----------------------------|---|
| Económicos- Financieros | <ul style="list-style-type: none"> • Análisis Costo Beneficio ABC: Definir alternativas, Seleccionar periodo de análisis, Identificar beneficios directos e indirectos, Identificar costes directos e indirectos, Transformar beneficios y costes a valores monetarios, Cálculo de Indicadores: VAN, TIR, B/C, PRI, Decisión en base a indicadores. • Análisis de coste del ciclo de vida (LCCA): Definir alternativas a evaluar, Seleccionar periodo de análisis y tasa de descuento, Estimar costos para la agencia (A), para el usuario (B), costos a futuro, el valor residual, Comparación de alternativas |
| Técnicos | <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad Estructural • Condición del estado del Pavimento: International Roughness Index (IRI), Pavement Condition Index (PCI), Efectividad de Tratamiento |
| Ambientales | <ul style="list-style-type: none"> • Consumo Energético • Reducir daños al medio ambiente debido a emisiones de CO₂ • Uso de Materiales reciclados • El ruido generado en los trabajos de mantenimiento. |
| Sociales | <ul style="list-style-type: none"> • La percepción de ciudadanos beneficiarios • Proximidad a infraestructura social y económica • Seguridad del peatón, impulso al turismo y creación de empleo • Población beneficiaria |
| Seguridad | <ul style="list-style-type: none"> • Accidentalidad y Densidad de Tráfico |
| Turística | <ul style="list-style-type: none"> • Cercanía a lugares turísticos |

Fuente: Adaptado de Espinoza Valarezo (2018) y Torres Machí (Torres Machí, 2015).

Para desarrollar el análisis multicriterio, con la herramienta AHP, se considera los aportes de varios investigadores, los mismos que se registran en la Tabla 5.

Tabla 5

Aportes de investigadores sobre criterios de selección en modelo de toma de decisiones

| Autores | Criterios de selección en toma de decisiones |
|--|--|
| Torres-Machi et. al (2015) y Espinoza Valarezo (2018). | Considera evaluar las emisiones de CO ₂ derivadas de los tratamientos aplicados a los pavimentos flexibles |
| Amador-Jimenez & Serrano, (2017) | Importancia de la infraestructura social y turística de la zona de influencia |
| Cafiso et al. (2001) | Consideran como criterios sociales: “percepción de ciudadanos beneficiarios”, “proximidad a infraestructura social y económica”, “seguridad del peatón”, “impulso al turismo” y creación de empleo |
| Godoy, Mourgues, and Chamorro (2015) | Coinciden con el anterior en los dos primeros criterios, pero además agregan: “población beneficiaria” y “existencia de vías alternas”. |

1.2.6 Tecnológicas aplicadas a los sistemas de gestión de mantenimiento de vías

1.2.6.1 Geographic Information Systems (GIS)

El *Geographic Information Systems (GIS)* son “herramientas informáticas capaces de gestionar y analizar la información georreferenciada, con vistas a la resolución de problemas de base territorial y medioambiental” (Santos Preciado, 2020). En este sentido, se facilita la elaboración de una base de datos espaciales y se mejora los procesos de análisis. “La recolección de la información mediante una base de datos espaciales lleva a una reducción en tiempos de evaluación y a una facilidad de acceso en procesos futuros” (Silva-Balaguera et al., 2018). En consecuencia, se mejoran los rendimientos de análisis de los datos y toma de decisiones en la selección de opciones de intervención idóneas.

En el contexto de la infraestructura vial, el manejo de información mediante los sistemas de información geográfica, “permite una evaluación del pavimento de manera histórica y

zonificada” (Silva-Balaguera et al., 2018). En otras palabras, esta herramienta informática integra una base de datos de evaluaciones e intervenciones realizadas en periodos anteriores, que sirven para evaluar la infraestructura y a la vez predecir su condición futura, así como, para ubicar geográficamente esta información.

En efecto, Bazlamit et al (2017), elabora un inventario de la red de carreteras utilizando *GIS*, para el registro de información técnica como: volúmenes de tráfico, propiedad de materiales, espesor de capas de pavimento, sistemas de drenaje, entre otros. Esta base de datos georreferenciados es completa e integrada, de modo que se mejora el proceso de evaluación y toma de decisiones en el mantenimiento de las vías.

Para tomar una decisión oportuna en la gestión de infraestructuras, como en cualquier otro campo, el *GIS* proporcionan herramientas que facilitan el análisis de variables de manera individual y combinada, mediante la aplicación de métodos como: método Analítico Jerárquico (AHP), Lógica Difusa, Función de Valor, entre otros. Para trabajar en el análisis multicriterio se requiere que las capas de mapas estén en formato raster para realizar los procesos matemáticos.

1.2.6.2 Building Information Modeling (BIM)

En palabras de Vera Galindo (2018), el *Building Information Modeling (BIM)* es una metodología que reúne toda la información de una infraestructura vial o de edificaciones, en un modelo digital creado por especialistas en diferentes áreas, que trabajan de forma conexas en todas las etapas del proyecto. Igualmente el Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento (2019), señala que el BIM es una herramienta informática que gestiona información de obras civiles y de edificación, mediante un modelo tridimensional que incluye información paramétrica, gráfica y no gráfica de un proyecto.

El Modelo BIM facilita un flujo continuo y dinámico de información, debido a que puede ser actualizado en cualquier momento y se trabaja en un entorno colaborativo; además es multidimensional y multidisciplinar lo que permite una gestión integral y eficiente del ciclo de vida de un proyecto. Para Marzouk & Othman (2020), los modelos utilizan códigos de construcción como vínculos entre modelos y la base de datos; su flexibilidad

y adaptación permite su aplicación en todo tipo de proyecto. Las dimensiones que integran el sistema BIM se constituye en una innovación del diseño tradicional en planos 2D, ya que incorpora modelos tridimensionales (3D) con información geométrica, de Programación (4D) simulando las fases del proyecto, de Costos (5D), Ambientales (6D), Mantenimiento y Operación (7D) y Seguridad (8D).

La incorporación de un modelo BIM para gestionar el ciclo de vida de un proyecto permite disponer de información centralizada, fiable y actualizada en tiempo real; que puede ser analizada y utilizada para tomar las mejores decisiones durante las diferentes etapas del proyecto.

BIM se complementa e interactúa de manera dinámica con otras aplicaciones informáticas, en las diferentes partes de un proyecto. Entre los softwares utilizados en el entorno BIM están los desarrollados por las siguientes empresas: Autodesk, Archibus, Bentley Systems, Data Desing System, Tekla, entre otros fabricantes sin fines de lucro. La empresa Autodesk propone varios softwares para entorno BIM, entre ellos están: Autocad, Civil 3D, Infracworks, Revit.

El software Autodesk Infracworks, permite “modelar, analizar y visualizar conceptos de diseño de infraestructura”(Autodesk, 2021). El diseño preliminar del proyecto se fundamenta en las variables específicas para cada tipo de infraestructura; los diseños son eficientes, lo que permite a los técnicos tomar la mejor decisión considerando la ubicación, topografía, tipo de suelo, longitud del trazado, las secciones transversales, y otros factores que inciden en el diseño del proyecto. Autodesk Infracworks permite integrar contenidos del sistema de información geográfica, en la generación de modelos, de imágenes satelitales, nube de puntos, geometría CAD 3D, y otros formatos compatibles con esta herramienta.

1.2.6.3 Integración BIM y GIS

La metodología BIM usa códigos de vinculación con otros formatos y base de datos que le permiten colaborar de manera integral, eficiente y dinámica durante todas las etapas del proyecto. En palabras de Marzouk & Othman (2020), esta colaboración fortalece el

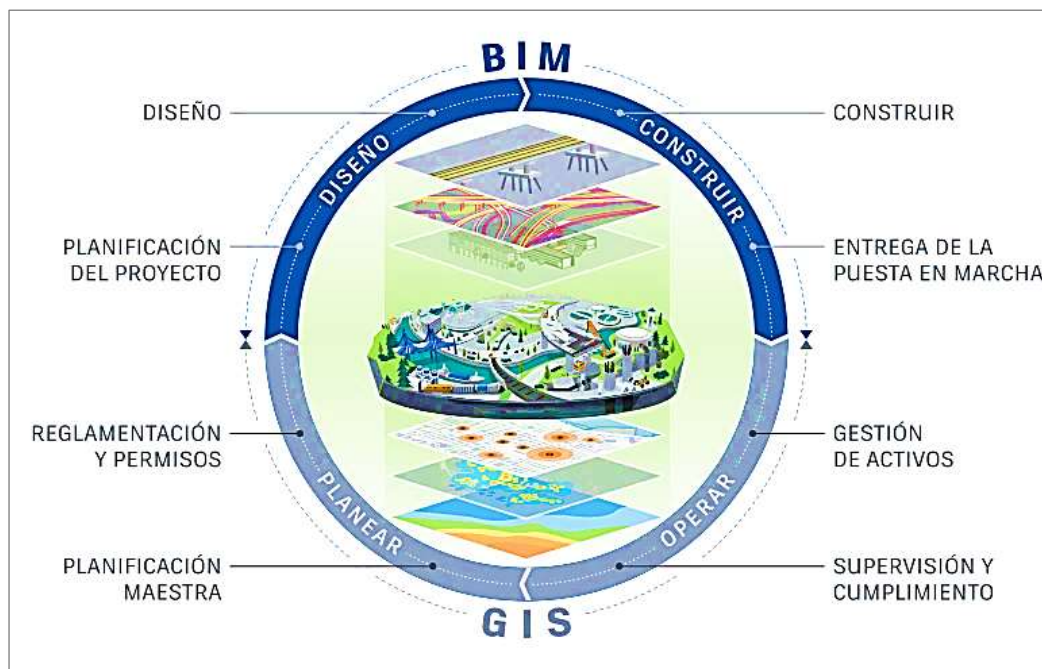
procesamiento de datos y aumenta la fiabilidad del modelo. En este contexto la integración de GIS al BIM ayuda a los planificadores y administradores en la toma de decisiones, principalmente en la etapa de diseño de proyectos de ciudades y de infraestructura, mejorando el rendimiento, así como, enriqueciendo los datos en tiempo real, gracias a la versatilidad de la herramienta.

Al integrar BIM y GIS se fortalece la planificación de proyectos de manera sostenible, se optimiza rendimientos y recursos; como lo expresa Autodesk (2019) este nuevo enfoque de integración de los dos sistemas permite una toma de decisiones inteligente, la participación es activa de las partes interesadas, mejora los tiempos de programación de las obras, reduce costos y se logra infraestructuras resilientes e inteligentes.

En la Figura 17, se expone los flujos de trabajo generados por la integración de BIM y GIS, que permiten una colaboración perfecta durante el ciclo de vida útil, una comprensión holística de la infraestructura, información completa y fiable de todos los factores que intervienen en el proyecto.

Figura 17

Flujos de Trabajo Generados por la Integración BIM y GIS



Fuente: Autodesk (2019)

El BIM se centra en el modelo tridimensional de forma intrínseca y el GIS se encarga de georreferenciar los elementos y relacionarlos entre sí, para el análisis de datos mediante relaciones espaciales y/o semánticas. De manera que se puede aprovechar la información digital por todos los miembros del proyecto y conocer las alternativas, analizar los impactos, tomar decisiones idóneas y oportunas; en consecuencia, mejorar la eficiencia operativa del proyecto.

La integración BIM y GIS se ha utilizado en el proyecto de la autopista A-76, es un trabajo pionero en España; estas dos herramientas tecnológicas combinan los elementos geométricos con datos alfanuméricos asociados (atributos), en un marco común. Mediante un visor 3D GIS on line, se accede al proyecto de manera transparente y fácil. Los técnicos, clientes, colaboradores, contratistas o usuarios en general, pueden consultar información de cada etapa del proyecto.

La integración BIM y GIS permite potenciar el modelo mediante el análisis topológico de datos de manera que se conecten con otros datos correctamente georreferenciados, sin importar su origen. Esta integración fortalece la calidad técnica del proyecto, en virtud, de que se puede visualizar mediante el modelo digital todos los elementos multidisciplinarios, en todas sus fases; de esta manera se puede mejorar la integración ambiental, optimizar la coordinación entre las disciplinas que intervienen, al disponer de un entorno común de trabajo colaborativo, con la ayuda de los softwares y de sus formatos interoperables.

1.3 Antecedentes Referenciales

En la Tabla 6, se expone las contribuciones de varios autores sobre los modelos de gestión del mantenimiento de pavimentos flexibles, quienes consideran el uso de la tecnología en la elaboración de modelos de predicción de los deterioros de los pavimentos y de toma de decisiones.

Tabla 6

Contribuciones de autores sobre modelos de mantenimientos de pavimentos

| Autor | Título | Contribución |
|-----------------------------------|---|---|
| Hafez & Ksaibati, 2021 | <i>Studying the Effectiveness of Changing Parameters in Pavement Management Systems on Optimum Maintenance Strategies of Low-Volume Paved Roads</i> | Analiza la incidencia del sistema de gestión de pavimentos en la eficiencia de las vías, se realiza a nivel de red y de proyecto. Evalúa tres tipos de fisuras generadas por: fatiga, agrietamiento longitudinal y transversal, clasificadas por el índice de condición del pavimento. Como parte de los objetivos y políticas consideran el análisis de los factores: TPDA, mantenimiento y la eficacia de los tratamientos aplicados. Para la toma de decisiones elaboran modelos de optimización multiobjetivo. Consideran restricciones de presupuesto, así como el material utilizado, en este caso el material es reciclado en frío <i>in situ</i> combinado con una capa fina de sello de viruta. Concluyen que los modelos de optimización maximizan los beneficios de las actividades de mantenimiento. Argumentan que la aplicación de tratamientos combinados proporciona una mayor relación costo-beneficio. Recomiendan estas acciones para el caso de vías de alto tráfico. |
| Al-Mansoori et al., (2020) | <i>A GIS-Enhanced Pavement Management System: A Case Study In Iraq</i> | El plan integra el inventario de la red de carreteras, datos que se registran espacialmente en GIS, que incluye la información de su geometría, tráfico, deterioros del firme, valores de PCI, mantenimiento aplicado y sus costos; se evalúa los agrietamiento, surcos, baches y sangrado, utilizando modelos probabilísticos basados en las cadenas de Markov. El monitoreo de la propuesta se realiza en mapas de ArcGIS, que permite el análisis y/o la modificación de datos para estimar prioridades de mantenimiento que conducen a una eficiente operación de la vía. Es decir facilita la toma de decisiones. El plan se aplica a nivel de red y a nivel de proyecto. Concluyen que este sistema de gestión de mantenimiento mejora las condiciones actuales y futuras de las vías y se puede replicar en otras ciudades para conseguir la eficiencia de las carreteras a menor costo. |

| Autor | Título | Contribución |
|----------------------------------|---|---|
| Thomas Tschickardt (2019) | “BIM im Verkehrswegebau am Beispielprojekt “Verfügbarkeitsmodell A10/A 24” | Proyecto que integra el BIM en la etapa de construcción y mantenimiento de las carreteras, en virtud del manejo de la información de manera central, colaborativa entre todas las áreas del proyecto. Reduce tiempos de ejecución, incrementa la productividad y eleva la calidad, se evita la información redundante, la exclusión de datos relevantes. Se realiza seguimiento del cronograma de mantenimiento. Concluyen que el BIM es un componente elemental desde el inicio del proyecto, en lo relacionado a la etapa de mantenimiento y operación se debe desarrollar cada vez más para obtener un valor agregado en el sector de la infraestructura, así como, la integración BIM-GIS sería un aporte importante. |
| Siswanto et al. (2019), | <i>Analytical Hierarchy Process (AHP)</i> | Propone un modelo de toma de decisiones en el sistema de gestión de mantenimiento de carreteras. Plantea cuatro criterios: condición del pavimento, tráfico, uso de suelo y factor económico; cada uno con sus respectivos subcriterios. La implementación del AHP en la gestión de mantenimiento de vías da flexibilidad en la propuesta de criterios a analizar, así como en los valores de ponderación. La toma de decisiones bajo este método es subjetiva, siendo relevante las actuaciones de los especialistas en mantenimiento. |
| Almuhanna et al. (2018) | <i>Using PAVER 6.5.7 and GIS program for pavement maintenance management for selected roads in Kerbala city</i> | Propone un sistema de mantenimiento a bajo costo, basado en el PCI. Se aplica norma ASTM D6433 para el proceso de evaluación de pavimentos. Se utiliza el GIS para la recolección y registro de datos, así como, para la toma de decisiones en la selección de los tramos a intervenir y de los tipos de tratamientos. Este sistema garantiza la eficiencia del mantenimiento del pavimento en la red vial en estudio. |

| Autor | Título | Contribución |
|---|--|---|
| Zhiliang & Yuan (2017) | <i>Integrated Application of BIM and GIS: An Overview</i> | Estudio exploratorio que relaciona dos tecnologías de la información como son <i>GIS</i> y <i>BIM</i> ; tanto en la fase de planificación y diseño, como en las etapas de construcción, operación y mantenimiento. Este estudio evidencia una brecha en el campo de la infraestructura. Los modelos <i>BIM</i> en el entorno geoespacial ayudan a verificar los sitios aptos para la construcción de nuevas obras, facilitan la gestión de información, horarios, suministro de materiales, se puede simular movimientos de tierras, evaluaciones de transitabilidad y gestión. Recomiendan investigar sobre plataformas colaborativas para el control de la infraestructura. |
| Fakhri & Dezfoulian (2017) | <i>Application of GIS for Pavement Maintenance Prioritization Based on a New Approach at a Network Level</i> | Plan de mantenimiento integral y óptimo con conocimiento de las condiciones pasadas, presentes y futuras del pavimento; considera los costos de los usuarios y de las agencias gestoras. Utilizan <i>GIS</i> para la visualización de los deterioros de pavimento y de la priorización, mediante la codificación de colores. Se recopila información, mediante una inspección visual, se evalúa la condición del pavimento. Los tratamientos son: sellado de grietas, parcheo y superposición fina. Se prioriza las intervenciones en las vías en función del <i>PCI</i> , tráfico, desempeño y restricciones financieras. La integración del <i>GIS</i> permite potenciar la eficiencia operativa de la red vial. |
| Amador-Jimenez & Serrano, (2017) | <i>Pavement Management: A Service-Based Optimal Allocation Of Roads' Interventions</i> | Propone un sistema de gestión vial basado en un indicador de accesibilidad considerando el tiempo de viaje de las personas hacia los centros de salud y centros educativos. El caso de estudio es la provincia de El Oro, donde no se cuenta con un sistema de gestión vial, lo que dificulta un proceso de toma de decisiones efectivas para dar mantenimiento adecuado a las vías. Usa la velocidad promedio esperada, que depende del material de la superficie, alineación geométrica y de la condición actual de la vía (rugosidad), la distancia de viaje se definió en metros a partir de un mapa georreferenciado, Se estudió la accesibilidad. Esta investigación muestra un déficit en la asignación de los recursos relacionados al mantenimiento. Una estrategia eficiente es asignar los recursos económicos, durante el primer año, para aplicar micropavimento. A partir del segundo año, se pavimente los caminos de ripio. Consideran que al final de un periodo de 15 años, la mayoría de las vías estarían pavimentadas. |

| Autor | Título | Contribución |
|--|--|---|
| Mansour Fakhri, Reza Shahni Dezfoulian (2017) | <i>Application of GIS for Pavement Maintenance Prioritization Based on a New Approach at a Network Level</i> | La priorización del mantenimiento, que depende de varios factores como las condiciones del pavimento, el volumen de tráfico, los estándares de desempeño y las restricciones financieras, es una necesidad para el uso óptimo de los recursos y la selección de las mejores opciones. Se utiliza GIS, para la integración, recopilación, gestión, análisis y presentación de resultados de datos. Los modelos de deterioro del pavimento inciden en la gestión y priorización de los mantenimientos. Se desarrolla un enfoque de gestión a corto plazo. Se han elegido como actividades de mantenimiento el sellado de grietas, el parcheo y la capa delgada. Definitivamente, la implementación del Sistema de Gestión de Pavimentos (PMS) puede desempeñar un papel vital en la planificación óptima del mantenimiento. |

1.4 Antecedentes Contextuales

Según el Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de El Oro (2019), vía Machala – intersección con la vía troncal E-25 (Vía a Balosa) es un proyecto prioritario dentro de la Provincia de El Oro y del Cantón Machala, esta vía se categoriza como un Eje Estratégico Principal Cantonal dentro del inventario del plan vial de la prefectura y considerada de primer orden por su capacidad vial.

1.4.1 Ubicación geográfica y política

La vía en estudio está ubicada en Ecuador, provincia de El Oro, cantón Machala; el trazado de la vía inicia en el Puente Voluntad de Dios de la Parroquia urbana Machala y termina en la intersección con la Trocal E25, en la parroquia rural El Retiro.

En la Tabla 7, se muestra las coordenadas UTM de la abscisa 0+000 y de la abscisa 14+268; así como, en la Figura 18, se representa el trazado geométrico de la vía en un mapa georreferenciado elaborado en ArcGIS.

Tabla 7

Coordenadas UTM de la Vía Balosa

| | Abscisa | Latitud | Longitud |
|----------------------------------|---------|-----------|-----------|
| Inicio (Puente Voluntad de Dios) | 0+000 | 9637174.1 | 615823.46 |
| Final (Intersección Troncal E25) | 14+268 | 9621001.4 | 615473.44 |

Fuente: Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de El Oro (2019)

Figura 18

Plano de Ubicación Vía Balosa



1.4.2 Características del área de estudio

En el documento de impacto ambiental, el Gobierno Provincial Autónomo de El Oro (2013), se expone que el área de estudio se ubica sobre la planicie costera al oeste de la cordillera occidental, está conformado por manglar en su mayor porcentaje; litológicamente se encuentra depósitos arcillo-arenoso-limoso de materiales arrastrados y depositados por los ríos, producto de la erosión de la cordillera, además se encuentran gravas y cantos rodados, la geomorfología de la zona presenta un relieve plano con

pendientes menores a 25 grados, hidrológicamente encontramos el nivel freático menor a cinco metros, estudios de geodinámica indican erosión baja, socavación baja.

La vía Balosa inicia en la zona urbana de Machala y se desplaza por un área rural de producción agropecuaria y camaronera, existen asentamientos humanos de poca magnitud, en la actualidad se está promoviendo proyectos urbanísticos en varios sectores a lo largo de la vía, esto generará incremento de población y del parque automotor.

Esta vía permite comunicar a Machala con la Troncal E25 de manera rápida, sin embargo; en las condiciones actuales de deterioro del pavimento; así como, la falta de señalización, paraderos de transporte público inadecuados, no se puede garantizar la seguridad vial de los usuarios, ni el menor tiempo de viaje. Además, las viviendas incumplen la norma de distancia mínima para este tipo de vía, esto incrementa la peligrosidad de desplazamiento al pasar por estas zonas pobladas. Por este motivo la entidad administradora de la carretera ha desarrollado un proyecto de mejoramiento de las características geométricas, funcionales y estructurales de la vía que se ajuste a la demanda de tráfico actual y futura; al crecimiento poblacional y al desarrollo productivo de la región.

1.4.2.1 Topografía

La topografía de zona es regular, el rango de pendientes es de cero a tres por ciento; las curvas de nivel van desde los cinco metros a diez metros sobre el nivel del mar.

1.4.2.2 Clima

En Machala, durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 21 °C a 31 °C y rara vez baja a menos de 20 °C o sube a más de 33 °C. La temporada calurosa dura 3,3 meses, del 3 de febrero al 13 de mayo, y la temperatura máxima promedio diaria es más de 30 °C. La zona de estudio de la vía es de clima seco, temperatura de 24 °C y precipitaciones entre 200 y 500mm.

1.4.2.3 Población beneficiaria

La población beneficiaria está integrada por los residentes de la zona, los propietarios y trabajadores del sector camaronero, bananero, los estudiantes de los diferentes centros de educación ubicados en el sector (Unidad Educativa Manuel Centeno Garzón, Unidad Educativa Manuela Cañizares y Escuela Miguel Ángel Cobos Pineda, Olinda Gálvez de Armijos) y toda persona que necesite movilizarse desde Machala a Santa Rosa y a cada zona poblada del área de influencia de la vía. En general el impacto positivo de esta vía se verá reflejada en la disminución de costos por el tiempo de viaje, en las nuevas plazas de empleo, el mejoramiento de la seguridad vehicular y peatonal y en el desarrollo productivo del área de influencia de la vía Balosa.

CAPITULO 2. MÉTODOS

2.1 Métodos

“El método significa el camino por seguir mediante una serie de operaciones y reglas prefijadas de antemano para alcanzar el resultado propuesto”(Baena Paz, 2017). En la presente investigación se expone los procedimientos de forma secuencial para obtener la información, caracterización y elaboración un modelo de mantenimiento de vías de primer orden. Los métodos aplicados en esta investigación son: Teóricos (análisis y síntesis documental) y Empíricos (de campo, entrevistas).

2.1.1 Teórico Documental

“La investigación documental es la búsqueda de una respuesta específica a partir de la indagación en documentos”(Baena Paz, 2017). El método teórico documental nos facilita la búsqueda de información sobre vías de primer orden y los modelos de mantenimiento, mediante la revisión de artículos técnicos y científicos publicados en revistas indexadas, en trabajos de titulación de maestría, libros, leyes y reglamentos.

El Plan de búsqueda se desarrolla realizando las siguientes fases: selección de base de datos *Scopus*, *Web of Science*, *Ebsco Host*, catálogo de *Latindex*, *Scielo*, *Science Direct*, y otros repositorios; se dio prioridad a los artículos que tienen afinidad completa con el tema en estudio; se analizó información de Tesis de Maestría, de Doctorado, libros y las memorias de diseño del proyecto de ampliación de la vía Balosa.

Para la búsqueda se ingresó las palabras claves, así como las preguntas de la investigación. Se selecciona los artículos de los últimos cinco años, y aquellos que son publicaciones de más de cinco años y que su aporte es importante en el desarrollo del modelo de mantenimiento.

De los 38 artículos revisados, nueve aportan sobre evaluación y modelos de predicción en los sistemas de gestión de pavimentos; 12 describen los modelos de toma de decisiones

considerando diferentes criterios (tres aportan sobre emisiones de CO₂). También 17 artículos corresponden a modelos de gestión de pavimentos, de los cuales nueve utilizan GIS, tres integran GIS Y BIM y 5 aplican otras tecnologías.

2.1.2 Empírico de Campo

Según Baena Paz (2017), la investigación de campo tiene como finalidad recoger y registrar ordenadamente los datos relativos al tema escogido como objeto de estudio. Este levantamiento de datos se realiza mediante instrumentos que permiten controlar los fenómenos. Las técnicas de campo son: La observación que es el contacto directo con el objeto de estudio; y la interrogación que consiste en el acopio de testimonios, orales y escritos.

Con la finalidad de realizar un diagnóstico de los procesos de mantenimiento de las vías administradas por las instituciones públicas provinciales y nacionales, se realizó la entrevista no estructurada a los siguientes profesionales: Ing. Guido Azanza Espinoza, ex Director de Obras Públicas del Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) Provincial de El Oro; Ing. Jorge Marlon Romero Apolo e Ing. Jorge López Aguilar, ex técnicos de infraestructura vial del GAD Provincial de El Oro; Ing. Oscar Añazco ex Director del MTOP. El instrumento utilizado se muestra en el Anexo L.

2.2 Tipos de Estudio

En un primer momento de la investigación se realizaron estudios exploratorios, mediante un análisis documental-cualitativo del objeto de estudio a través de la búsqueda, lectura, interpretación de la información de fuentes primarias y secundarias que nos permitió el primer acercamiento de lo expresado por varios autores sobre el mantenimiento de vías y los principales aportes de las nuevas tecnologías de la información.

A continuación, este proceso se orientó a los estudios descriptivos de las variables mantenimiento sostenible y vías de primer orden, analizando la información de la memoria técnica y planos del Proyecto de Ampliación de la Vía Machala – Intersección

con la Vía Troncal E-25 (Vía a Balosa), donde se describe las características geométricas, estructura de pavimento y plan de mantenimiento.

Luego, se correlacionan las variables: mantenimiento sostenible y la eficiencia de las vías de primer orden. Esta correlación se manifiesta en el momento que se aplican nuevas tecnologías; esto permite un trabajo conexas, disminución de tiempo en la recolección de información, análisis de datos, evaluación, toma de decisiones de mantenimiento requerido. En consecuencia, esta automatización en los procesos permite adoptar medidas oportunas para mantener la vía en condiciones de eficiencia a lo largo de su vida útil.

2.3 Paradigma

Esta investigación obedece a un paradigma positivista por cuanto el conocimiento sobre el mantenimiento y la eficiencia de las vías se consiguió mediante métodos empíricos libres de juicios de valor, este conocimiento es objetivo, las variables: mantenimiento y eficiencia de las vías se correlacionan y el modelo de mantenimiento es el resultado de la investigación que puede ser generalizado. Como lo explica Ricoy Lorenzo (2006), el paradigma positivista se aplica al campo de las ciencias naturales, se califica de cuantitativo, empírico-analítico, racionalista, sistemático gerencial y científico-tecnológico. El producto final de la investigación se puede generalizar a otras vías de la provincia y del país.

2.4 Enfoques

Según Johnson & Onwuegbuzie (2004), el enfoque mixto es el tipo de estudio donde el investigador mezcla o combina técnicas de investigación, métodos, enfoques, conceptos o lenguaje cuantitativo o cualitativo en un solo estudio. Para Hernández Sampieri et al. (2014), las investigaciones cualitativas se basan en un proceso inductivo (explorar y describir, y luego generar perspectivas teóricas); van de lo particular a lo general; y el enfoque cuantitativo siguen un proceso y se generaliza los resultados encontrados en un grupo (muestra) a una colectividad mayor (población). El enfoque cuantitativo utiliza la lógica o razonamiento deductivo.

En base a lo expuestos, se estableció que esta investigación tiene un enfoque mixto, debido a que se utilizó el enfoque cuantitativo para analizar y sintetizar las mediciones o valores numéricos de las variables que interviene en las diferentes etapas del modelo, como el cálculo de ejes equivalentes a partir de los datos del estudio de tráfico, para determinar los valores predictivos del PCI; estos resultados intervienen en otra etapa del modelo, como en el análisis de los criterios a ser definidos para el modelo de toma de decisiones, además se evidencia el enfoque cuantitativo en la aplicación de GIS para establecer los puntos críticos, así como, los tramos seleccionados para ser monitoreados. El enfoque cualitativo permitió el análisis y la síntesis de la información recopilada mediante la entrevista no estructurada aplicada a los profesionales del área de vialidad del GAD provincial de El Oro, para el diagnóstico de las condiciones actuales de los planes de mantenimiento y de la tecnología utilizada para su aplicación en las vías regentadas por la institución provincial. Esta combinación de enfoques facilitó la elaboración del marco teórico que orientó esta investigación.; así como el proceso analítico y toma de decisiones del modelo de mantenimiento.

2.5 Población y Muestra

El universo de esta investigación son las vías de primer orden del Ecuador, la población de estudio, las Vías de Primer Orden de la Provincia de El Oro y la muestra que se analizó fue la Vía Machala – Intersección con la Vía Troncal E-25 (Vía a Balosa). Esta muestra se definió como no probabilística, tomada a conveniencia por sus características específicas, como lo menciona Pimienta Lastra (2000), la muestra puede ser seleccionada de acuerdo a criterios de selección que aplique el investigador. En este caso la vía Balosa cumple con las características técnicas de trazado geométrico y estudio de tráfico de una vía de primer orden, información registrada en las memorias de diseño del proyecto de ampliación de la vía, elaborado por el GAD provincial de El Oro.

Se utilizó valores del tráfico promedio diario anual (TPDA) como variable de entrada para el modelo de predicción del deterioro del pavimento, así como, para el cálculo de los índices de los criterios considerados en el modelo de toma de decisiones. Para determinar los tramos de la vía que deben ser monitoreados, se aplica la siguiente ecuación de segmentación:

$$n = \frac{N * \sigma^2}{\frac{e^2}{4} * (N-1) + \sigma^2} \quad (8)$$

Para definir los puntos críticos de la vía, se aplicó análisis multicriterio a través de la herramienta ArcGIS.

2.6 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

El levantamiento de datos de la vía en estudio se realizó mediante la entrevista no estructurada a los técnicos responsables del proyecto y de los planes de mantenimiento del Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de El Oro. Asimismo, se basó de testimonios escritos y digitalizado de los diseñadores del Proyecto de Ampliación de la Vía Machala – Intersección con la Vía Troncal E-25 (Vía a Balosa). Como indica Orellana López y Sánchez Gómez (2006), la digitalización de las fuentes documentales y el acceso a internet brindan al investigador un abanico de oportunidades para la recolección de datos, en tiempo real.

Otra técnica que se aplicó es la estadística descriptiva, que permitió el análisis e interpretación cualitativa-cuantitativa de las características técnicas de la vía Balosa, particularmente en los procesos matemáticos para determinar el modelo de predicción de deterioro, teniendo como datos de entrada el estudio de tráfico. Además se aplicó en el en la determinación de los tramos a ser evaluados, en los puntos críticos que deben ser monitoreados de forma continua; así como, en el desarrollo del modelo de toma de decisiones.

2.7 Descripción del Procedimiento

En la Figura 19, se resumen el procedimiento de la metodología aplicada en este trabajo de investigación, se inicia en la recolección de información mediante los métodos teóricos y de campo, a continuación se desarrolla el análisis de datos de la vía Machala – intersección con la vía troncal E-25 (vía Balosa), registrados en las memorias de diseño del proyecto de ampliación. Posteriormente, se diseña el modelo de mantenimiento sostenible, aplicando los criterios de gestión de infraestructura vial, las recomendaciones

del documento *Brundtland* sobre los objetivos de desarrollo sostenible y las herramientas tecnológicas: GIS (ArcGIS) y BIM (Autocad Civil 3D, Infracore).

Figura 19

Procedimiento de la metodología de investigación aplicada

Recolección de información

- Se realizó la búsqueda de información en base de datos como Web of Science, Ebsco Host, Scopus, catálogo de Landitex, Scielo, Science Direct, y otras; además se analizó información de Tesis de Maestría, de Doctorado y libros. Para la búsqueda se ingresó las palabras claves, así como las preguntas de la investigación. Mediante el análisis documental se sintetizó las ideas principales de las fuentes primarias, así como de las fuentes secundarias; y con la ayuda del gestor de texto se organizó las ideas y se referenció el documento, aplicando la norma APA séptima edición.

Análisis de Datos de la vía Machala – intersección con la vía troncal E-25 (vía a Balosa)

- Se hizo un análisis de las características técnicas de la vía Balosa, mediante la revisión bibliográfica de los siguientes documentos: resumen ejecutivo, especificaciones técnicas, planos del trazado de la nueva vía, estudio ambiental, estudio de tráfico y memoria de diseño. Además se realizó entrevistas no estructuradas a funcionarios del GAD Provincial y a Expertos en el tema investigado.

Diseño del modelo de gestión de mantenimiento sostenible, aplicando GIS (ArcGIS) y BIM (Autocad Civil 3D, Infracore)

- Se digitalizó el diseño geométrico de la vía en entorno BIM y GIS, a continuación se hizo el modelo de predicción de deterioro de la vía para su periodo de diseño; en función de este modelo, se analizó las posibles intervenciones para los primeros cinco años. Se consideró criterios técnicos, sociales, ambientales, así como los costos de las acciones del mantenimiento para hacer el modelo de toma de decisiones que permitió planificar acciones preventivas para conservar en buen estado la vía.

Discusión de resultados y Conclusiones

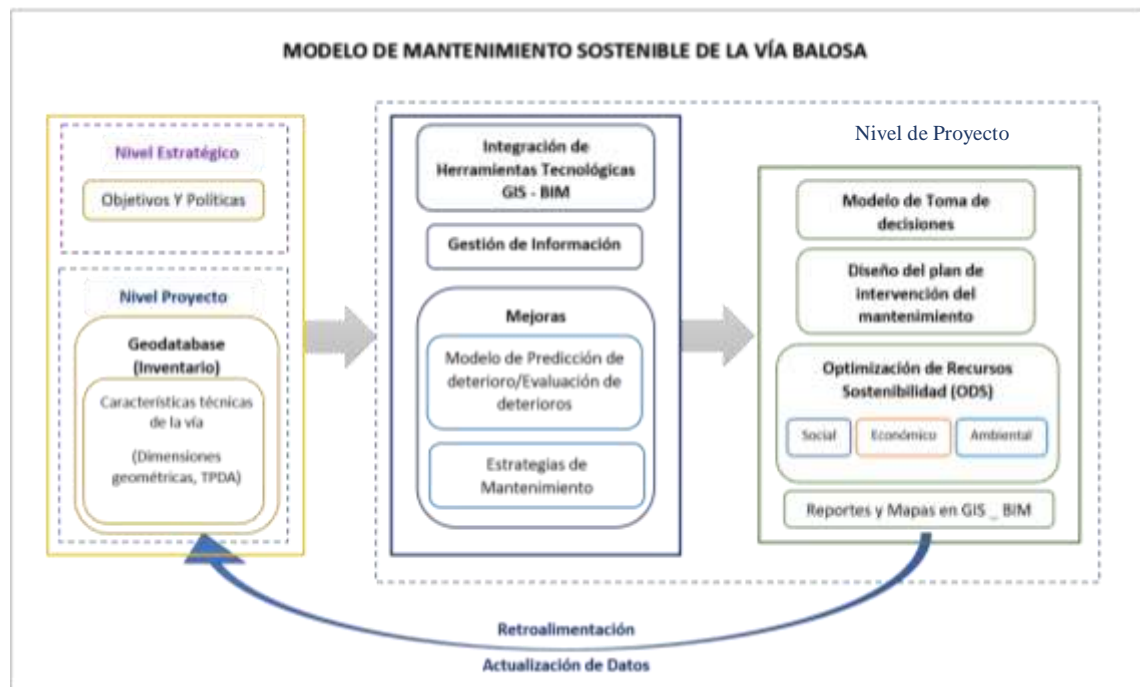
- El aporte de otros investigadores sobre modelos de mantenimiento de vías, facilitaron la fundamentación teórica de este trabajo, así como la sustentación de las propuestas realizadas en la presente investigación. A continuación se realizó las conclusiones donde se sintetizó el cumplimiento de los objetivos planteados, destacando los aportes innovadores relacionados a la aplicación de tecnología de la información que facilitan el trabajo colaborativos en un entorno común y se recomienda su aplicación en el sistema de gestión de la red vial de la provincia de El Oro.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

El modelo de gestión de mantenimiento sostenible de pavimento de la vía Balosa, se muestran en la Figura 20 y en el Anexo M. A continuación del diagrama se describe el resultado obtenido de cada componente que lo integra.

Figura 20

Modelo de Gestión de Mantenimiento Sostenible de Pavimento de la Vía Balosa



3.1 Objetivos y Políticas

El objetivo principal es conseguir el mayor beneficio a largo plazo para mantener la eficiencia de la vía, dentro del presupuesto asignado por la institución gestora, para el cumplimiento de este objetivo se aplican políticas sostenibles, considerando criterios que maximicen el confort de los usuarios, la accesibilidad a centros de interés social, minimice las molestias a la comunidad, disminuya costos, así como, mitigue los impactos ambientales. Se aplican acciones preventivas de mantenimiento.

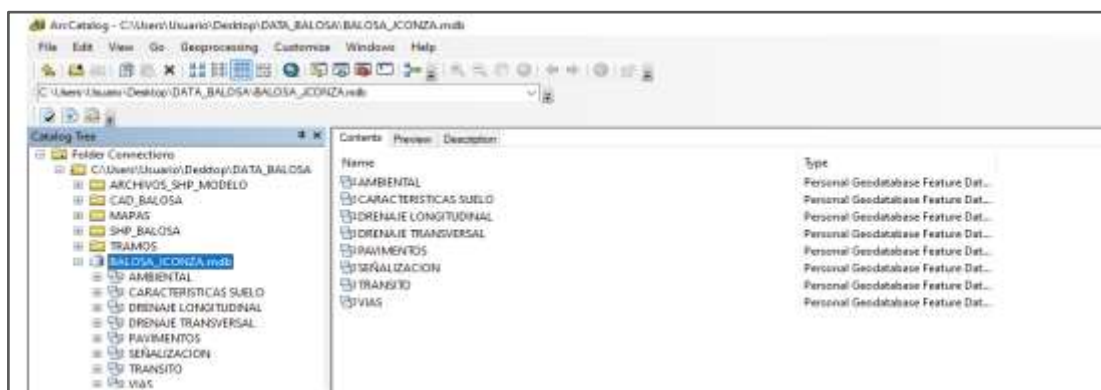
3.2 Base de datos (Inventario)

Se creó una Geodatabase en ArcGIS 10.5, para registrar los datos tomados de la memoria del proyecto de la vía Balosa. Considerando lo manifestado por Zagvozda et al. (2019), se incluye: la jerarquía de la vía, la geometría, el volumen y composición de tráfico, la estructura del pavimento, los modelos de predicción de la condición del pavimento, los tipos de tratamiento en función de los daños, las emisiones de CO₂ y costos de cada tratamiento, así como otros criterios de tipo social. Además, se registró información de las cartografías de Autodesk Infracore y ArcGIS; archivos shapefile públicos tomados del geportal del Instituto Geográfico Militar; y otros de elaboración propia.

En la Figura 21, se muestra la organización de los datos dentro de la Geodatabase; donde se registra el inventario inicial de la vía, el mismo que se actualiza en el momento que se requiera. Se clasificó la información de la siguiente manera: Ambiental (Emisiones de CO₂ de los materiales propuestos para las intervenciones), Suelos (tipos), Drenaje (longitudinal y Transversal), Pavimentos (Deterioros, PCI, Predicciones PCI), Señalización, Tránsito (Volumen y clase de vehículos) y Vías (características geométricas). En este trabajo se registra información en: ambiental, pavimentos, tránsito y vías.

Figura 21

Geodatabase de la Información de la Vía Balosa



A continuación, se describe los elementos que conforma la base de datos espaciales del presente estudio.

3.2.1 Geometría de la Vía Balosa

Los datos geométricos fueron tomados de los documentos del proyecto de mejoramiento y ampliación de la Vía Balosa, desarrollado por el GAD provincial de El Oro, que se encuentran en el portal del Servicio Nacional de Contratación Pública del Ecuador. En la Tabla 8, se resume las principales características geométricas de esta vía.

Tabla 8

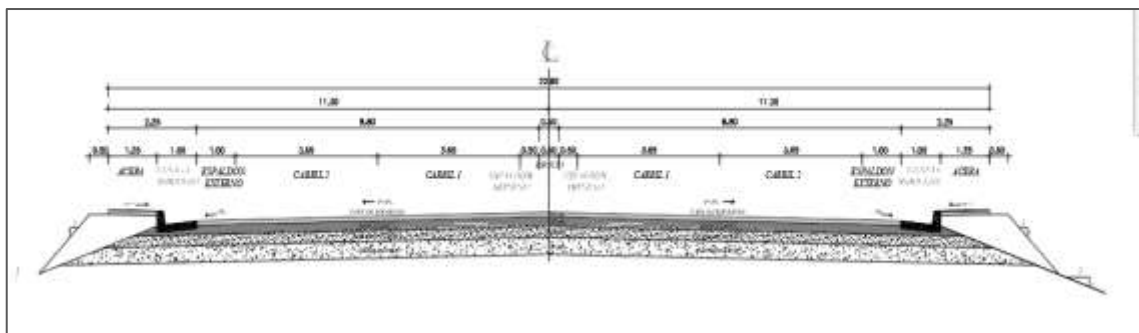
Características Geométricas de la Vía Balosa

| CARACTERÍSTICA | UNIDAD | VÍA BALOSA |
|--------------------------------|--------|--------------|
| Categoría de la vía | | Primer orden |
| Número de carriles por calzada | u | dos |
| Velocidad de diseño | Km/h | 80 |
| Ancho de carril | m | 3.65 |
| Ancho de calzada | m | 7.3 |
| Ancho de arcén | m | 0.5 |
| Pendiente máxima longitudinal | % | 6 |
| Pendiente mínima longitudinal | % | 2 |
| Peralte máximo | % | 8 |
| Talud de relleno | | 1.5 H:1V |

En la Figura 22, se muestra la sección tipo, las dimensiones se mantienen constantes en toda la vía. Sin embargo, en lo referente a las aceras solo se construyen en los tramos correspondientes a la abscisa 0+000 hasta la abscisa 6+605; así como, desde la abscisa 13+680 hasta la abscisa 14+268.

Figura 22

Características Geométricas de la Sección Transversal de la Vía Balosa

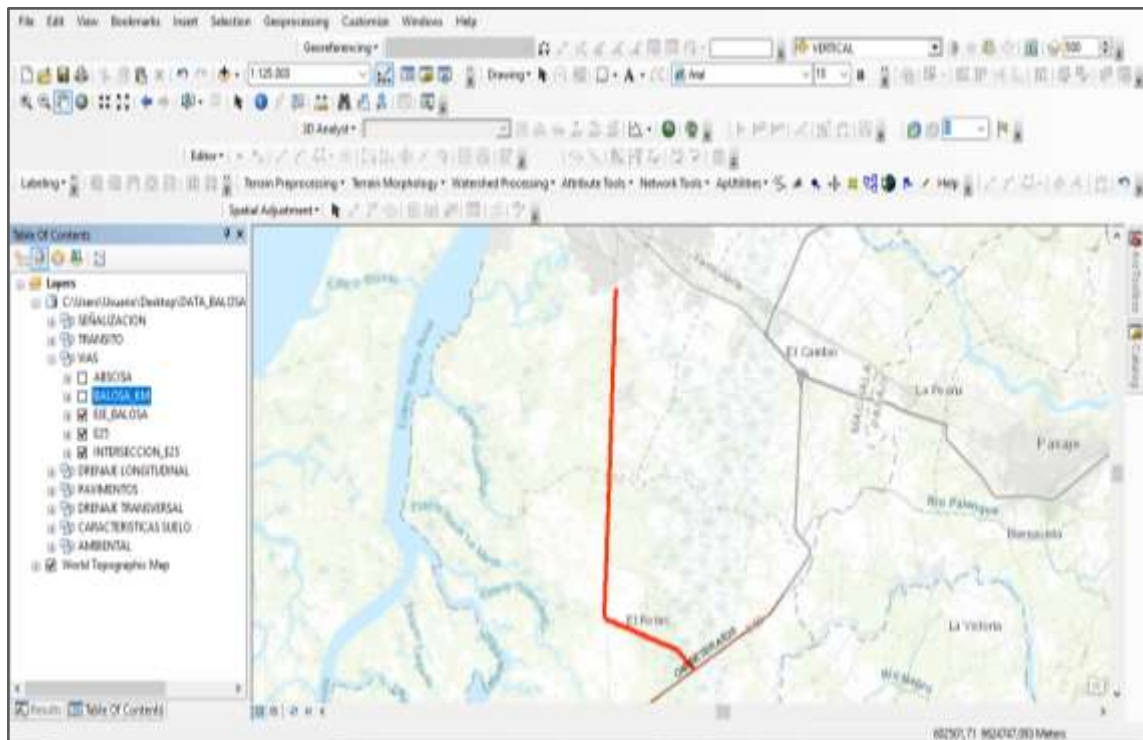


Fuente: Adaptado del GAD provincial El Oro (2019).

En la Figura 23, se muestra el eje de la vía Balosa, digitalizado en el Software ArcGIS, previamente elaborado en Autocad de Autodesk, a partir de los datos tomados de los documentos del GAD provincial El Oro, que se encuentran en el portal del Sistema Nacional de Compras Públicas de Ecuador. Los datos de los elementos de la vía, están en las coordenadas de proyección UTM del sistema de referencia WGS84 Sur.

Figura 23

Trazado del Eje de la Vía Balosa, en ArcGIS



3.2.2 Estudio del tráfico

Los datos para este modelo son tomados del estudio de tráfico realizado por el GAD Provincial de El Oro (2019), para el proyecto de ampliación de la Vía Balosa. En la Tabla 9, se resume el conteo de tráfico, por tipo de vehículo, abscisa y sentido de circulación. En la Tabla 10, se resume los valores de tráfico actual (TA), el tráfico generado (20% TA), tráfico desviado (10% TA) y el Tráfico promedio diario anual (TPDA).

Tabla 9

Conteo de Vehículos en la Vía Balosa

| TIPO DE VEHÍCULO | Abscisa 0+000 | | Abscisa 6+700 | | Abscisa 14+268.96 | |
|------------------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | Machala | Santa | Machala | Santa | Machala | Santa |
| | Santa Rosa | Rosa Machala | Santa Rosa | Rosa Machala | Santa Rosa | Rosa Machala |
| Automóvil | 3040 | 2625 | 2140 | 1600 | 1260 | 650 |
| Camioneta | 4345 | 3150 | 1600 | 1225 | 787 | 312 |
| Buses | 310 | 27 | 140 | 150 | 30 | 50 |
| Camiones de 2 ejes | 1200 | 1295 | 600 | 415 | 266 | 53 |
| Camiones de 3 ejes | 415 | 135 | 55 | 130 | 30 | 5 |
| Camiones de más de 3 ejes | 35 | 35 | 30 | 50 | 10 | 10 |
| Total | 9345 | 7267 | 4565 | 3570 | 2383 | 1080 |

Fuente: Adaptado del GAD provincial El Oro (2019).

Tabla 10

Tráfico Promedio Diario Anual de la Vía Balosa

| Abscisa | Tráfico Actual | | Tráfico Generado | | Tráfico Desviado | | TPDA | |
|---------|----------------|------|---------------------|-------|------------------|-------|-------|------|
| | L | P | L | P | L | P | L | P |
| 0+000 | 13160 | 3452 | 2632 | 690.4 | 1316 | 345.2 | 17108 | 4487 |
| 6+700 | 6565 | 1570 | 1313 | 314 | 656.5 | 157 | 8534 | 2041 |
| 14+268 | 3009 | 454 | 601.8 | 90.8 | 300.9 | 45.4 | 3911 | 590 |

Nota. Tráfico liviano (L), tráfico pesado (P). Fuente: Adaptado del GAD provincial El Oro (2019).

El GAD Provincial de El Oro (2019) calcula las proyecciones de tráfico siguiendo la tasa de crecimiento anual de 4.08% para vehículos livianos, para camiones 5.08 % y para buses 5.63 %. Aplica un promedio de índice de crecimiento de 5.36% para determinar el crecimiento de vehículos pesados. La ecuación es aplicada en el cálculo del tráfico futuro:

$$Tf = TPDA(1 + i)^n \quad (9)$$

En la Tabla 11, se muestran los valores correspondientes al tráfico de diseño, calculados a partir del TPDA, el factor de crecimiento anual (i), para un periodo de diseño de 20 años.

Tabla 11

Tráfico Futuro de la Vía Balosa

| Abscisa | Livianos | Pesados | Total Vehículos |
|----------------|-----------------|----------------|------------------------|
| 0+000 | 38067 | 12749 | 50816 |
| 6+700 | 18991 | 5799 | 24790 |
| 14+268 | 8705 | 1676 | 10381 |

Fuente: Adaptado del GAD provincial El Oro (2019).

El GAD provincial de El Oro estableció que es una vía de primer orden, basado en el valor de tráfico futuro de 50816, y en la clasificación funcional de carreteras recomendado por el MTOP.

3.2.3 Estructura del pavimento de la vía

En la Tabla 12, se resume los datos diseño de la estructura del pavimento flexible de la

Tabla 12

Diseño de Pavimento de la Vía Balosa

| CAPA | UNIDAD | CANTIDAD |
|---|----------------|-----------------|
| Capa de rodadura, espesor (0.10 m) | m ² | 258268.18 |
| Asfalto RC-250 para imprimación (1.5 lt/m ²) | l | 387402.26 |
| Base clase I (0.20 m) | m ³ | 71790.71 |
| Sub base clase II (0.25 m) | m ³ | 69917.90 |
| Mejoramiento de la subrasante con suelo seleccionado (0.35 m) | m ³ | 99882.72 |

Fuente: Adaptado del GAD provincial El Oro (2019).

3.2.4 Condiciones climáticas

Según el INAMHI (2021), en la zona de ubicación de la vía en estudio se presenta rangos de temperatura entre 25 y 32 grados centígrados, humedad entre 50 y 60%. Asimismo en

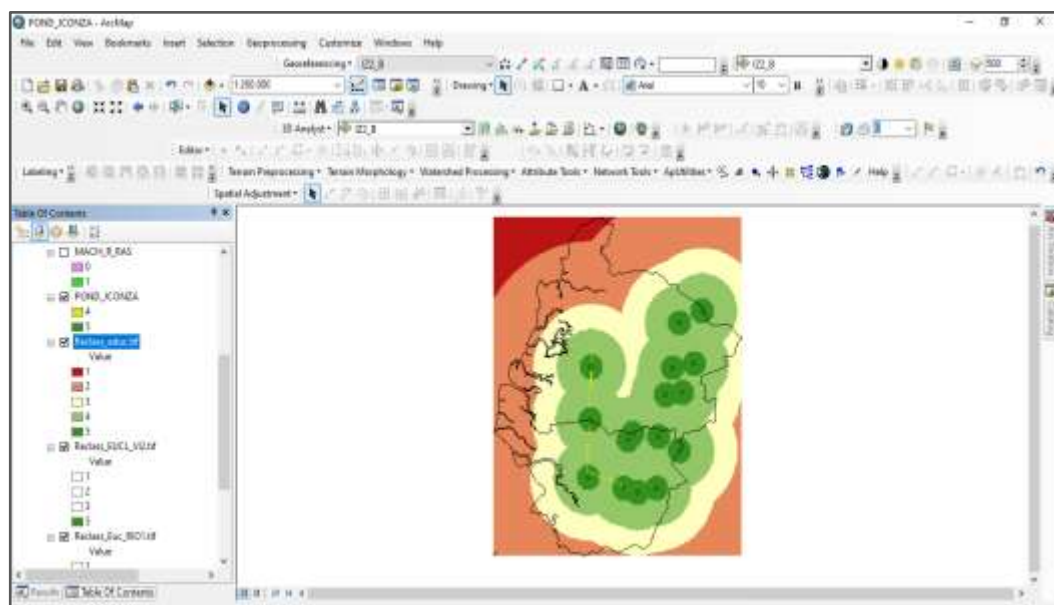
el portal web de Gestión de Riesgo de Ecuador (2021), publica que el rango de precipitación para la zona de estudio varía desde 50 a 70 mm al día.

3.2.5 Definición de los puntos críticos

Los puntos de mayor atención en la fase de mantenimiento de la carretera son los siguientes: accidentalidad, impacto de las precipitaciones sobre el pavimento flexible, postes de transmisión de energía eléctrica, ríos, canales de riego, zonas inundables, y otros. En relación a este trabajo se considera el impacto por inundaciones, en virtud de que durante los meses de lluvias esta zona se convierte en un área de alto riesgo, por su cercanía al mar, su topografía plana, la presencia del río Motuche y canales de riego; en consecuencia, es necesario un monitoreo continuo de estas áreas, con la finalidad de identificar oportunamente el deterioro del pavimento flexible. Para determinar las zonas prioritarias a ser evaluadas, se realizó un análisis multicriterio utilizando la herramienta de superposición ponderada de ArcGIS, como se muestra en la Figura 24.

Figura 24

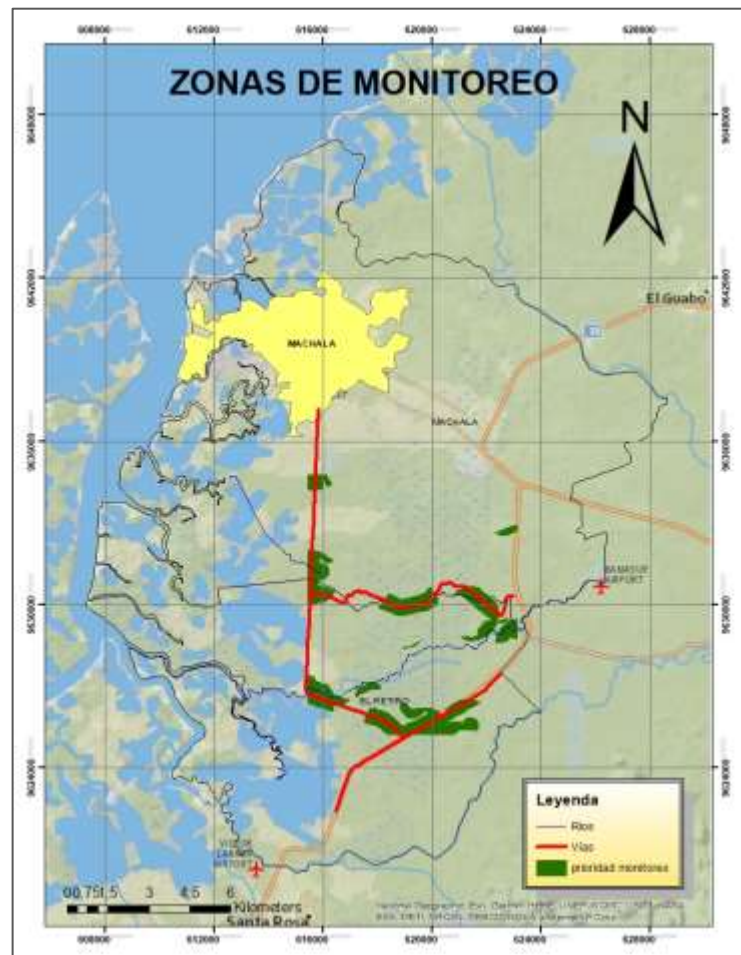
Evaluación de Zonas para Monitoreo Continuo de la Condición de la Vía



En la Figura 25, se expone las zonas de monitoreo continuo. Estas áreas prioritarias se definieron a partir del análisis de la densidad de vehículos pesados que circulan por la vía y de las distancias de cada variable con respecto a la vía.

Figura 25

Zonas Prioritarias de Evaluación de la Condición de la Vía Balosa

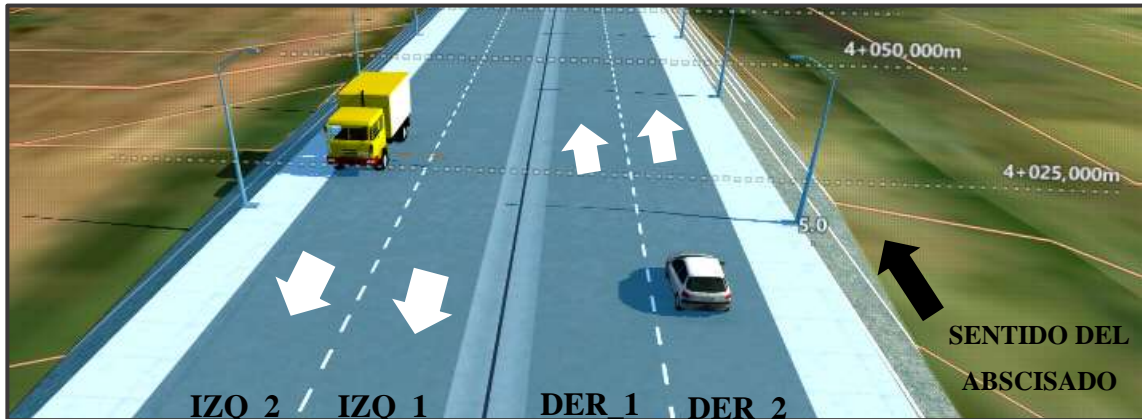


3.3 Evaluación del pavimento

La evaluación del pavimento se realiza mediante el método del índice de Condición del Pavimento (PCI), bajo la norma ASTM D6433. Para el levantamiento de datos en campo es necesario identificar el área de inspección e identificar los carriles y el sentido de las abscisas, para ello se propone organizar la vía de acuerdo a lo expuesto en la Figura 26.

Figura 26

Identificación de Carriles y Sentido del Abscisado para Tramificación de la Vía



3.3.1 Determinación de unidades de muestreo

Para definir las muestras se dividió cada carril de la vía en tramos de longitud de 40 m y su área es de 146 m², valor que está dentro del rango 225 ± 90 m², establecido en la Norma ASTM D 6433, inciso (2.1.7). El número de muestra por carril es de 356 tramos; para calcular las unidades de muestras a ser evaluadas, se considera un error aceptable de e=±5 puntos PCI y una desviación estándar de 10, por ser la primera evaluación; el resultado es de 16 unidades a ser evaluadas, en intervalos de 22. Los datos obtenidos se registran en la Tabla 13; así como, en la Figura 27, se representa el diagrama de muestras a evaluar.

Tabla 13

Cálculo de Unidades de Muestra a ser Evaluadas

| | Longitud carril | 14250 m |
|------------------------------------|---|--------------------|
| Longitud muestra | | 40 m |
| Área muestra | | 146 m ² |
| N = Lcarril/Lmuestra | | 356 muestras |
| Número de muestras a evaluar (n) | $n = \frac{Ns^2}{\frac{e^2}{4(N-1)} + s^2}$ | 16 |
| Desviación estándar (s) | | 10 |
| Error admisible (e ± 5 puntos PCI) | | 5 |
| Intervalos | $i = \frac{N}{n}$ | 22 |

Figura 27

Diagrama de Muestras a Evaluar e Intervalos

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | |
|---------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|
| evaluar | Intervalo | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | evaluar | |
| 0+040 | 0+080 | 0+120 | 0+160 | 0+200 | 0+240 | 0+280 | 0+320 | 0+360 | 0+400 | 0+440 | 0+480 | 0+520 | 0+560 | 0+600 | 0+640 | 0+680 | 0+720 | 0+760 | 0+800 | 0+840 | 0+880 | 0+920 | 0+960 |

3.3.2 Criterios de inspección y registro de información

La inspección de la infraestructura debe ser realizada por técnicos calificados en patologías de carreteras. En el GAD Provincial de El Oro, los técnicos responsables del mantenimiento de carreteras son los encargados de evaluar la condición de la vía. Los datos son recogidos de forma manual y en formatos elaborados por ellos, la intervención la realizan en función del Plan Operativo Anual de la institución.

Para facilitar la recolección de la información en el campo, se recomienda el uso del software *ArcGIS Field Maps*, que es una aplicación de Esri, para *ArcMap*. Esta aplicación se puede instalar en *tablets* y en *Smartphone*.

Según Esri (2021), *ArcGIS Field Maps* es una aplicación que utiliza mapas basados en datos para capturar el inventario de activos. La recopilación y edición de datos móviles de activos, se hacen en tiempo real, agilizando los flujos de trabajo, sustituye los procesos en papel, brindando eficiencia y precisión. Esta aplicación puede ser configurada para trabajos específicos, dispone de mapas y formularios de campo pre configurados necesarios para el registro de información mediante los dispositivos móviles de manera eficiente, segura y en tiempo real. Se puede trabajar sin conexión.

Cada activo que se capture tiene una ubicación y un formulario. El registro de datos puede ser manual, mediante fotografía, video, código de barras y códigos QR, Se reutiliza valores y se actualiza formularios al mismo tiempo. Al completar el formulario, los trabajadores en campo deben verificar la información antes de enviar. La opción de envío no estará disponible hasta que se rellene todas las entradas requeridas y cuando existe un error de validación aparecerá un mensaje en rojo.

Al no disponer de la APP móvil de Esri para ArcGIS, se propone utilizar un formulario de Google para levantar información sobre las condiciones del pavimento y de otros elementos de la vía. El formulario se muestra en el Anexo N. Otra forma de recopilar información de los deterioros de la vía, es mediante una aplicación realizada en Excel, como se muestra en la Figura 28.

Figura 28

Recolección de Información de condición de pavimento en Excel (macros)

| CÓDIGO CARRIL | COORDENADA X | COORDENADA Y | TIPO DE DETERIORO | UNIDAD DETERIORO | NIVEL SEVERIDAD | CANTIDAD | FECHA |
|---------------|--------------|--------------|---------------------|------------------|-----------------|----------|------------|
| DER2 | 615748.30 | 9156432.50 | piel cocodrilo | m2 | medio | 0.85 | 25/10/2021 |
| DER2 | 615748.30 | 9156432.50 | piel cocodrilo | m2 | medio | 0.85 | 25/10/2021 |
| IZQ2 | 615823.46 | 9637174.13 | Parcheo | m2 | Leve | 1.30 | 25/10/2021 |
| DER2 | 615473.44 | 9637174.13 | Piel cocodrilo | m2 | Alto | 0.65 | 25/10/2021 |
| IZQ1 | 615823.46 | 9621015.41 | Piel de cocodrilo | m2 | Leve | 1.00 | 25/10/2021 |
| IZQ2 | 615823.46 | 9621015.41 | Piel de cocodrilo | m2 | Leve | 0.30 | 25/10/2021 |
| IZQ2 | 615823.46 | 9621002.41 | Grieta Transversal | m | Leve | 0.50 | 25/10/2021 |
| DER1 | 615823.46 | 9621001.41 | Grieta Longitudinal | m | MEDIO | 1.20 | 25/10/2021 |

Una vez efectuada la inspección visual se contrasta el nivel de severidad con las tablas de deterioro, verificando las tolerancias de los valores mínimos admisibles para identificar con que celeridad y prioridad se deben hacer las operaciones de mantenimiento.

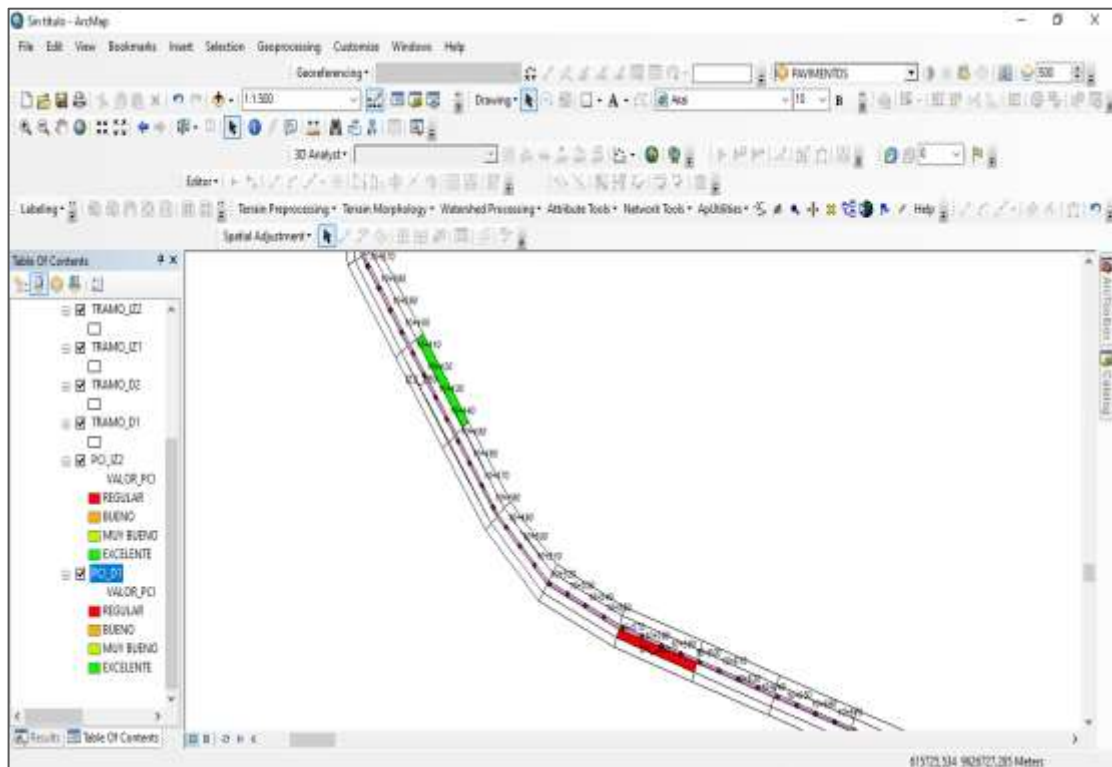
3.3.3 Índice de condición del pavimento (PCI)

En este trabajo se elabora un modelo de predicción de deterioro del pavimento, en virtud de que la vía Balosa, está en proceso de construcción y no procede las evaluaciones en

campo. Sin embargo, se propone utilizar el sistema de información geográfica para registrar los deterioros observados y analizados, en el momento que esté en operación la vía. En la Figura 29, se presenta un ejemplo del registro de los valores de PCI de las unidades de muestra, mediante capas vectoriales del GIS; una vez que la carretera esté en funcionamiento.

Figura 29

Valores PCI de las Unidades de Muestra de la Vía Balosa



3.4 Modelos de Predicciones PCI

En la Tabla 14, se registran las expresiones matemáticas de George et al. (1989), Wu (2015), así como la de Picado Muñoz (2016) que se aplicaron para elaborar los modelos de predicción de deterioros del pavimento flexible (PCI) de la vía Balosa. En la Figura 30, se muestra la representación gráfica del comportamiento de la condición del firme.

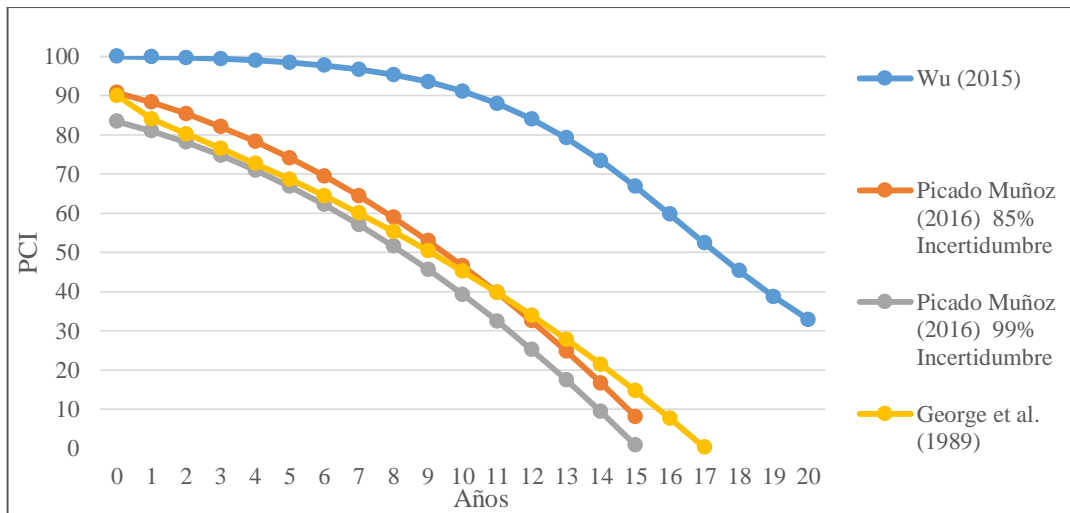
Tabla 14

Modelos de Predicción de Deterioro de Pavimento Flexible

| Modelo | Expresión Matemática | Variables |
|----------------------|---|--|
| George et al. (1989) | $PCI(t) = 90 - a[\exp(t^b) - 1]\log\left[\frac{ESAL}{SNC^c}\right]$ | ESAL=23x10 ⁷ SNC = 5 a = 0.6349 b = 0.4203 c = 2.7062 |
| Wu (2015) | $PCI(t) = 11.52 + \frac{88.86}{1 + \exp(0.33t - 5.45)}$ | t = años |
| Picado Muñoz (2016) | $PCI(t) = -0.2181 t^2 - 2.2359 t + 100 + 6.4386 Z_0$ | Para 99%, Z ₀ = -2.57583 Para 85%, Z ₀ = -1.43953 |

Figura 30

Curvas de Modelos de Deterioro Predictivo de la Vía Balosa



Nota. Análisis para 15 años de vida útil.

Al hacer un análisis comparativo de las curvas de comportamiento expuestas en la Figura 30, y relacionar con la clasificación de PCI de la Norma ASTM D 6433, se puede sintetizar lo siguiente:

El modelo de George et al. (1989), se aplicó considerando un periodo de diseño de 15 años; el comportamiento de la curva, muestra valores de condición excelente en el primer año; en el periodo de vida útil de dos a cuatro años la condición del pavimento se muestra

en muy buen estado, los valores de PCI van desde 80.23 a 72.66. La condición buena del firme se presenta a partir del año cinco hasta el año ocho, en este periodo los valores de PCI van desde 68.65 hasta 55.32. A partir del año nueve la condición del pavimento se encuentra en un estado regular. Esta curva permite el análisis de la condición predictiva del pavimento, considerando variables como: ESAL, SNC, edad y coeficientes de correlación. La condición oportuna de acciones preventivas se puede dar a partir del año dos del periodo de vida útil.

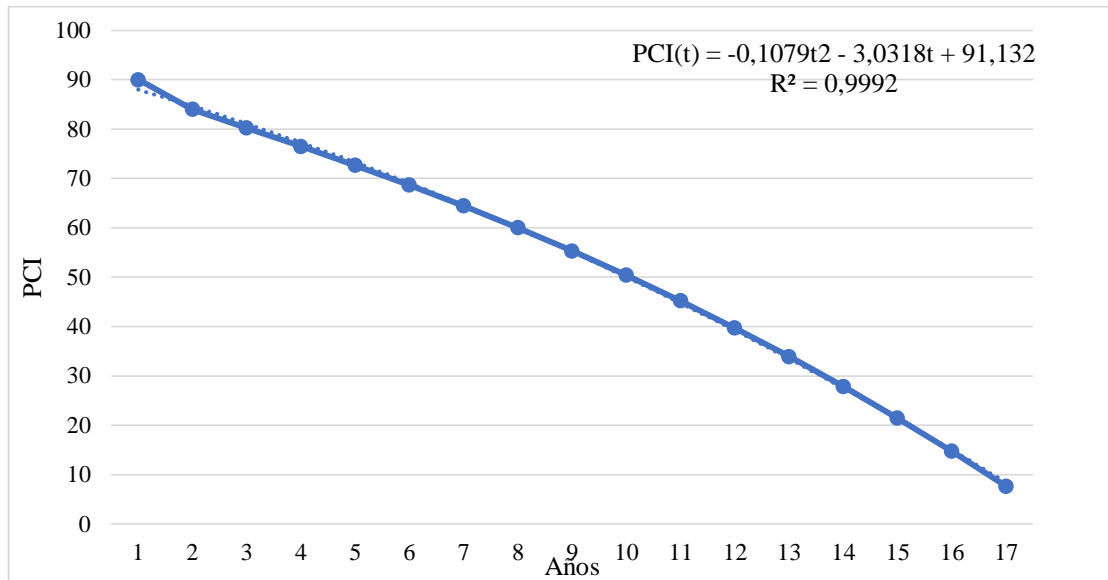
El modelo de Wu (2015), muestra una curva de deterioro de pavimento muy optimista, se observa una condición de pavimento excelente hasta el año 11 de vida útil, con valores de PCI entre 100 hasta 87.99. La condición muy buena del firme se mantiene desde el año 12 al año 14 del periodo de diseño; en los años 15 y 16 se mantiene una condición buena; a partir de 16.5 años se presentaría la condición regular del pavimento. La variable principal del modelo predictivo es la edad del pavimento; Las acciones preventivas se pueden considerar a partir del año 12 del periodo de vida útil.

El modelo de Picado Muñoz (2016), la variable considerada es la edad y se relaciona con porcentajes de incertidumbre. La curva que corresponde al 99% de incertidumbre presenta valores de PCI menores a 55, lo que representa una condición regular del pavimento; y la opción de intervenciones preventivas se da a partir del primer año. En la curva de 85% de incertidumbre la condición regular se presenta a partir del año nueve y la opción de mantenimiento preventivo a partir del año tres. En las dos curvas de comportamiento se mantiene la condición buena hasta el año seis a partir del año siete empieza a deteriorarse con mayor rapidez.

En virtud de lo expuesto, se consideró utilizar la curva de comportamiento que se muestra en la Figura 31, que corresponde al modelo de George et al. (1989); que se fundamenta en las variables: ejes equivalentes, número estructural y edad. La elaboración de esta gráfica se realiza con los datos de entrada de TPDA del estudio de tráfico de la vía Balosa, valores con los que se calcula el número de ejes equivalentes, además se determinó el número estructural de cada capa de pavimento utilizando el método de la AASTHO.

Figura 31

Curva de Comportamiento de Deterioro Predictivo de la Vía Balosa



3.5 Estrategias de mantenimiento

En la Figura 32, se muestra los criterios de mantenimiento en relación a valores de PCI. Como se puede observar a partir de valores de PCI de 85 se puede tomar la decisión de no hacer ninguna intervención, en virtud de que el estado del pavimento es excelente, sin embargo, se puede planificar acciones de prevención para valores de PCI mayores a 80.

Figura 32

Acciones de mantenimiento en función del PCI



Fuente: Adaptado de Tavakoli (1992), Sotil Chávez (2014).

3.5.1 Tratamientos considerados para la vía Balosa

Se sugiere la aplicación de micropavimentos y *slurry* como tratamiento preventivo, a partir de valores de PCI de 80. En la Tabla 15, se muestra los costes de varias acciones preventivas y correctivas recomendadas para el presente modelo.

Tabla 15

Actuaciones de Mantenimiento de Pavimento Flexible para Vía Balosa

| Tipo de actuación | Tratamiento sugerido | Costo/ unidad | Vida útil (años) | Rango de Aplicación |
|-------------------|--------------------------------------|---------------|------------------|---------------------|
| Preventiva | Micropavimento Tipo III e = 12mm | 3.89 | 4 a 7 | PCI >80 |
| | <i>Slurry</i> seal | 3.16 | 2 a 3 | |
| Correctiva | Bacheo (mezcla asfalto, asfalto RC-2 | 7.98 | 2 | 40 < PCI < 80 |
| | Fresado y reposición de firme | 30.45 | 8 | |
| | Reconstrucción de la sección | 81.27 | 20 | |

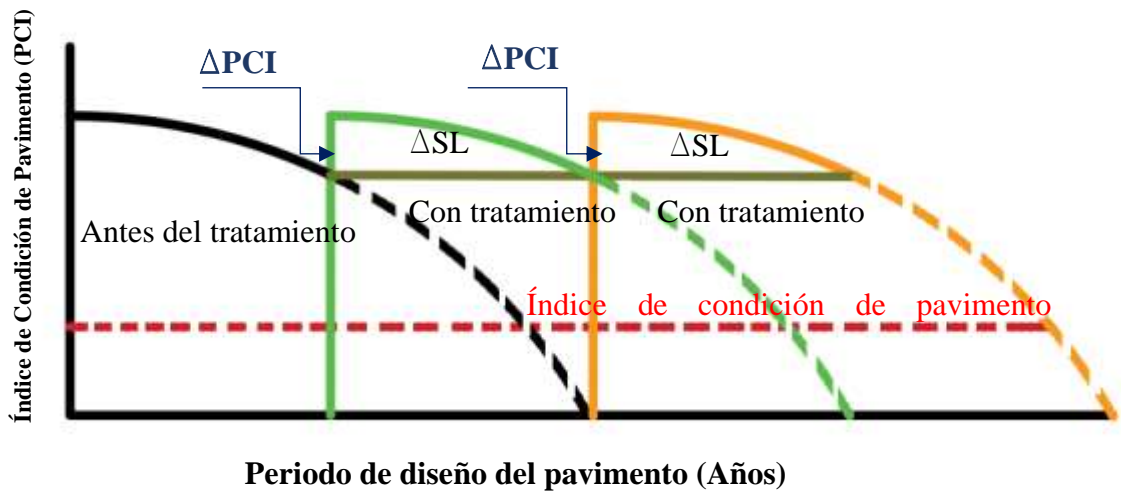
Fuente: Adaptado de Espinoza Valarezo (2018) y Hadjidemetriou et al. (2020).

3.5.2 Efectos de la aplicación del tratamiento

Produce un incremento de vida en el servicio del pavimento (ΔSL) y un aumento en su condición del estado (ΔPCI) en el momento de su aplicación. Según Giustozzi et al. (2011), la aplicación del tratamiento detiene el deterioro del pavimento. En este contexto, la curva de comportamiento después del tratamiento es paralela a la del deterioro inicial, trasladada en el tiempo que corresponde a la vida útil del tratamiento. En la Figura 33, se representa gráficamente este comportamiento del pavimento.

Figura 33

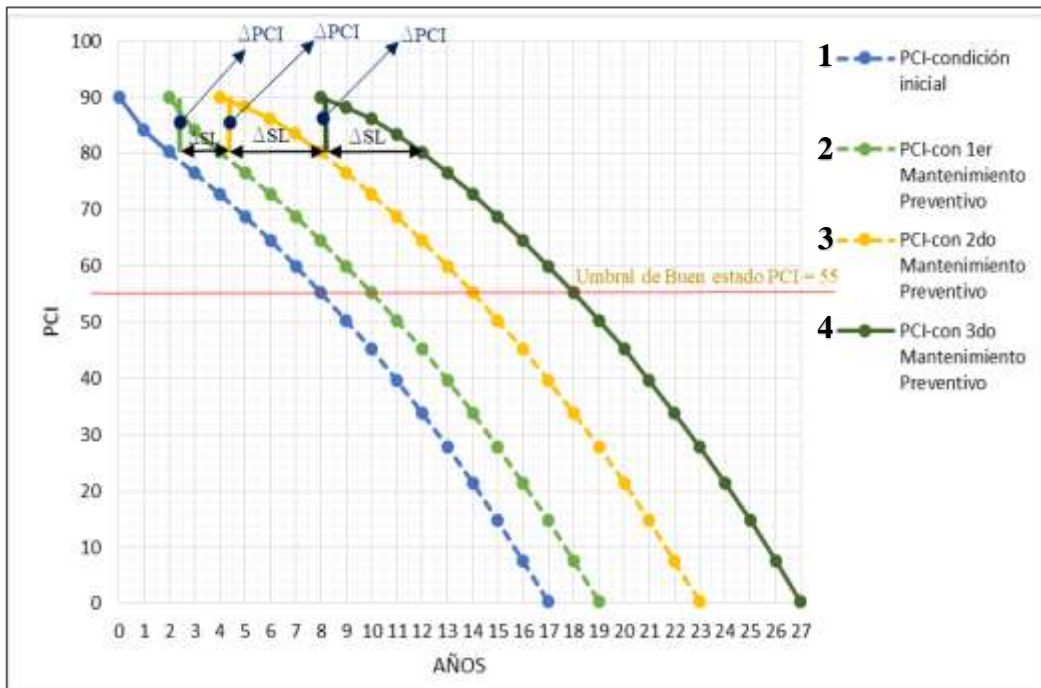
Modelo de Deterioro del Pavimento antes y después del Tratamiento



En la Figura 34, se muestra las curvas de comportamiento del pavimento, construidas a partir del análisis de las variables que intervienen en la expresión matemática de George et al. (1989), aplicando valores que corresponden a la vía en estudio.

Figura 34

Comportamiento del Pavimento antes y después del Mantenimiento



Entre los datos considerados en este modelo tenemos: predicción del PCI, tipos de tratamiento para mantenimiento preventivo y su periodo de vida útil.

El modelo de predicción de deterioro inicial o primera curva tiene valores de PCI menores a 80 a partir del año dos, representando una condición muy buena de pavimento. A los ocho años de vida útil se observa que llega al umbral de la condición buena del pavimento. Para este modelo, se recomienda un mantenimiento preventivo aplicando Slurry, tratamiento que tiene una vida útil de dos a tres años.

La segunda curva representa el modelo de predicción del deterioro del pavimento después de aplicar el primer tratamiento (Slurry); se grafica con un ΔSL de dos años (valor de vida útil del Slurry) y un ΔPCI de 8.82 (90-PCI en el momento de la intervención preventiva). El valor de PCI de 80.2 en este caso se presenta en el año cuatro y el umbral de condición de pavimento bueno se registra a los 10 años de vida útil del pavimento.

La tercera curva corresponde al modelo de predicción de deterioro del pavimento después de un segundo mantenimiento preventivo, en esta ocasión se considera un tratamiento con micropavimento, que tiene una vida útil entre cuatro a siete años. Se considera un ΔSL de cuatro años (límite inferior de la vida útil del micropavimento) y un ΔPCI de 8.82 (90-PCI en el momento de la segunda intervención preventiva). En consecuencia, se mantiene una muy buena condición de pavimento hasta los ocho años de su vida útil. El umbral de condición buena se presenta a los 14 años del periodo de diseño del pavimento.

Para representar gráficamente este modelo, se traslada el valor de 80.2 a un punto cuatro años después y se traza una curva paralela a partir de este valor, seguidamente se extrapola hacia atrás la curva para obtener los puntos intermedios hasta llegar al valor de PCI = 90. La nueva curva queda expresada en la siguiente ecuación:

$$PCI(t) = -0.2575t^2 + 1.1625t + 90.625 \quad (10)$$

Donde:

PCI(t) = índice de condición del pavimento flexible con tratamiento

t = edad del pavimento en años

La cuarta curva representa al modelo de predicción de deterioro del pavimento después de una tercera aplicación de tratamiento preventivo, en este caso se recomienda una nueva aplicación de micropavimento. Se toma como vida útil nuevamente los cuatro años. En consecuencia, el pavimento puede conservar su muy buena condición hasta los 12 años. Para representar gráficamente este modelo, se traslada el valor del PCI de 80.2 a un punto cuatro años después; y se traza una curva paralela utilizando la ecuación anterior.

La aplicación de los tratamientos se realiza alternando el tipo de material, en virtud de lo expresado por Torres Machi (2015), la efectividad de los tratamientos se reduce a un 50%, cuando estos se aplican de manera repetitiva; criterio basado en estudios realizados por Wei y Tighe (2004) y Giustozzi et al. (2012), quienes limitan el número de tres aplicaciones del mismo tratamiento.

3.6 Toma de decisiones en el proceso de mantenimiento de la vía Balosa

Se realizó dos modelos de toma de decisiones, el primero aplicando Tavakoli et al. (1992) y el segundo utilizando Análisis Multicriterio, mediante el método *Analytic Hierarchy Process* AHP de Saaty (1997).

3.6.1 Modelo de toma de decisiones aplicando la propuesta de Tavakoli et al (1992)

Para la elaboración de este modelo se aplicó la ecuación (7) del apartado 1.2.8.6; el periodo de análisis corresponde a los primeros cinco años de vida útil del firme. Los valores de PCI utilizados son del modelo de predicción de la condición del pavimento, calculado mediante la propuesta de George et al. (1989); los valores de los factores: tráfico, clase funcional, de ruta, de mantenimiento aplicado, son los recomendados por Tavakoli (1992), los resultados se registran en la Tabla 16.

Tabla 16

Cálculo del PI para la Toma de Decisiones de las Acciones de Intervención

| AÑO | PI | PCI | 1/PCI | TF | FC | TR | Índice de Mantenimiento | MF |
|-----|------|-------|-----------|-----|-----|-----|-------------------------|-----|
| 1 | 1.73 | 84.03 | 0.0119005 | 100 | 1.2 | 1.1 | 1 | 1.1 |
| 2 | 1.81 | 80.23 | 0.0124642 | 100 | 1.2 | 1.1 | 1 | 1.1 |
| 3 | 2.07 | 76.5 | 0.0130719 | 100 | 1.2 | 1.1 | 2 | 1.2 |
| 4 | 2.18 | 72.66 | 0.0137627 | 100 | 1.2 | 1.1 | 2 | 1.2 |
| 5 | 2.50 | 68.65 | 0.0145666 | 100 | 1.2 | 1.1 | 3 | 1.3 |

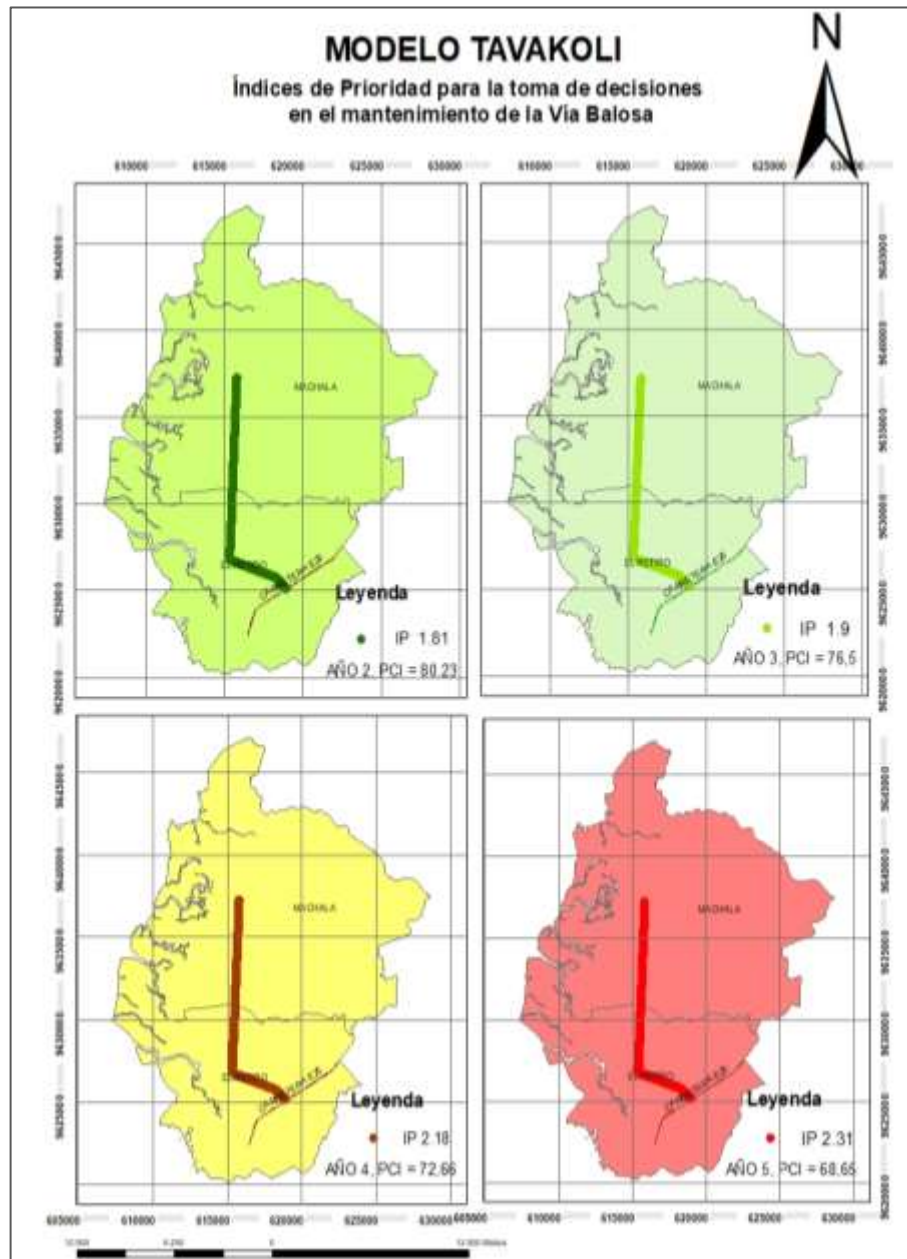
Nota. PI, Índice de Prioridad de intervenciones analizado en los primeros cinco años.

Este modelo de toma de decisiones nos muestra valores de PI que van desde 1.73 a 2.5. El máximo valor nos indica la prioridad de intervención, esta se presenta en el año cinco, sin embargo, en este año las condiciones de pavimento requieren acciones correctivas, por tener un PCI de 68.65. El valor mínimo se presenta en el año uno, cuando el PCI es de 84.03; en este caso no se requiere intervención. Con el propósito de planificar mantenimiento preventivo, se consideró programar la primera intervención en el año dos, que corresponde a un valor de PCI de 80.23.

La representación gráfica del modelo Tavakoli se muestra la Figura 35. Los datos espaciales y alfanuméricos corresponden al análisis de prioridad de los años dos, tres, cuatro y cinco. Estos mapas facilitaron la toma de decisiones para definir el tipo de tratamiento de menor impacto ambiental y el año idóneo para la acción preventiva.

Figura 35

Modelo Tavakoli para la Toma de Decisiones de Mantenimiento, Vía Balosa



3.6.2 Modelo de decisión multicriterio aplicando el método AHP

En el modelo de toma de decisiones se evalúan los criterios registrados en la Tabla 17.

Tabla 17

Criterios Considerados en Modelo Multicriterio para la Toma de Decisiones

| Criterio | Observación | | | | | | | | | | | | |
|--|---|-----------|-------|--------|---|-------|------|-------|------|-------|------|------|------|
| PCI | Medición de los daños del pavimento para acciones preventiva. (modelo de George et al,1989) | | | | | | | | | | | | |
| TPDA, | Para calcula la eficiencia económica y ambiental, se considera como la población a servir. (del estudio de Tráfico vía Balosa) | | | | | | | | | | | | |
| Incremento PCI (Figura 35, condición de pavimento con mantenimiento) | Se calcula obteniendo la diferencia entre el PCI esperado después de la actuación (PCI post) menos el PCI antes de la actuación (PCIi): $\Delta PCI = PCI\ post - PCIi$ Mide la eficiencia económica y ambiental de las actuaciones del mantenimiento de la vía. | | | | | | | | | | | | |
| Confort de usuarios | Valoración del confort de los usuarios en función de la condición del pavimento (PCI), como los indicados a continuación: <table style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Rango PCI</th> <th>valor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>100-85</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>85-70</td> <td>0.75</td> </tr> <tr> <td>70-55</td> <td>0.50</td> </tr> <tr> <td>55-40</td> <td>0.25</td> </tr> <tr> <td>< 40</td> <td>0.00</td> </tr> </tbody> </table> | Rango PCI | valor | 100-85 | 1 | 85-70 | 0.75 | 70-55 | 0.50 | 55-40 | 0.25 | < 40 | 0.00 |
| Rango PCI | valor | | | | | | | | | | | | |
| 100-85 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 85-70 | 0.75 | | | | | | | | | | | | |
| 70-55 | 0.50 | | | | | | | | | | | | |
| 55-40 | 0.25 | | | | | | | | | | | | |
| < 40 | 0.00 | | | | | | | | | | | | |
| Eficiencia económica de la actuación del mantenimiento | Para el cálculo, se utiliza la siguiente ecuación: $Eficiencia\ Económica = \frac{\Delta PCI * TPDA}{Coste\ actuación} \quad (11)$ <p>TPDA se considera como el número de beneficiarios. Se pretende priorizar las actuaciones economicamente más eficientes.</p> | | | | | | | | | | | | |
| Eficiencia Ambiental Se considera las emisiones de CO2 | Se relaciona con la cantidad de usuarios beneficiados (IMD) y la eficiencia de las actuaciones (incremento PCI), se expresa con la siguiente ecuación: $Eficiencia\ Ambiental = \frac{\Delta PCI * TPDA}{Kg\ de\ CO2} \quad (12)$ <p>“El criterio pretende priorizar aquellas actuaciones ambientales eficientes y descartar aquellas que ofrecen una pobre mejora de la condición, beneficiando a pocos usuarios y generando grandes cantidades de CO₂”(Espinoza Valarezo, 2018)</p> | | | | | | | | | | | | |
| Proximidad de la infraestructura social (escuelas, centros de salud, zonas turísticas) | Priorizar las actuaciones de los tramos de la vía que sea necesario intervenir, en función a la cercanía con infraestructura social. Se considera de mayor importancia los centros educativos cercanos a la vía en un radio de 500 metros. | | | | | | | | | | | | |

Para el cálculo de la eficiencia económica de la actuación del mantenimiento se utiliza los datos de los costos de los tratamientos registrados en la Tabla 15 y la ecuación 11. Para calcular la eficiencia ambiental, se consideran las emisiones de CO₂ derivadas de los tratamientos aplicados a los pavimentos flexibles. En la Tabla 18, se resumen los valores propuestos por Torres-Machi et. al (2015) y Espinoza Valarezo (2018).

Tabla 18

Emisiones de CO₂ Generadas por las Actuaciones de Mantenimiento

| Tipo de Actuación | Mantenimiento | Kg CO ₂ /m ² |
|-------------------|--|------------------------------------|
| Preventiva | Micropavimento | 1.51 |
| | Slurry | 0.76 |
| Correctiva | Reciclado in situ en frio | 5.49 |
| | Fresado y reposición de firme | 6.91 |
| | Reconstrucción (recrecida estructural) | 13.11 |

Fuente: Adaptado de Torres Machi (2015) y Espinoza Valarezo (2018)

El cálculo de las emisiones generadas por cada alternativa de mantenimiento, se define por la siguiente ecuación:

$$CO_2 \text{ (kg)} = L * a * \left(kg \frac{CO_2}{m^2}\right) \quad (13)$$

Donde:

CO₂ (kg) = Emisiones de CO₂ generadas por la alternativa expresas en Kilogramos

L= Longitud de la vía a intervenir (alternativa)

a = ancho promedio de la vía a intervenir (alternativa)

kg CO₂/m² = Kilogramo de CO₂ por metro cuadrado

Para el presente estudio, se propone acciones preventivas para toda la vía; en el caso de presentarse deterioros que amerite acciones correctivas, se considera las áreas afectadas. En este contexto el cálculo de emisiones de CO₂ se hace de acuerdo al tipo de intervención y tipo de material utilizado. En la Tabla 19, se muestra los valores de emisiones generadas por la aplicación de tratamientos preventivos y correctivos.

Tabla 19

Emisiones CO₂ por Acciones de Mantenimiento en la Vía Balosa

| Tipo de Acción | Mantenimiento | Kg CO ₂ /m ² | CO ₂ (kg) |
|----------------|--------------------------------|------------------------------------|----------------------|
| Preventiva | Slurry | 0.76 | 190741.7 |
| | Micropavimento | 1.51 | 378973.76 |
| Correctiva | Reciclado in situ en frio | 5.49 | 1377858.24 |
| | Fresado y reposición de firmes | 6.91 | 1734244.2 |

Nota. Longitud de vía 14260 m y ancho 17.6m.

En el criterio proximidad de infraestructura social, se asignan niveles de importancia a las infraestructuras sociales y turísticas de la zona de influencia. En este trabajo se considera de mayor importancia a los centros educativos. En la Tabla 20, se registra los niveles de importancia de la infraestructura educativa, en función de la cercanía al eje de la vía. Se asigna el valor de uno, a los centros que se encuentran ubicados a una distancia de 500 m, y el valor de 0.5, a los ubicados a 1000m. En este caso no existen centros educativos ubicados a una distancia de 1000m.

Tabla 20

Niveles de Importancia de la Infraestructura Social Cercana a la Vía Balosa

| Nivel de Importancia | Infraestructura Educativa |
|----------------------|----------------------------|
| 1 | Esc. Manuel Centeno Garzón |
| 1 | Manuela Cañizarez |
| 1 | Olinda Gálvez de Armijos |
| 1 | Miguel Ángel Pineda Cobos |

El método utilizado para la valoración cuantitativa en la toma de decisiones, fue el *Analytic Hierarchy Process* (AHP), propuesto por Saaty (1987). Como primer paso se construyó una matriz cuadrada, donde el número de filas y columnas corresponden al número de criterios considerados en este proceso. A cada elemento de la matriz se le asignó un valor comprendido entre nueve y uno, de acuerdo a la escala de valores de Saaty, como se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21

Criterios para el Análisis Jerárquico en la Toma de Decisiones, Vía Balosa

| | Confort usuarios | Eficiencia económica de tratamientos | Eficiencia ambiental | Proximidad a infraestructuras sociales | Vector |
|--|------------------|--------------------------------------|----------------------|--|--------|
| Confort usuarios | 1.00 | 3.00 | 3.00 | 5.00 | 0.51 |
| Eficiencia económica de tratamientos | 0.33 | 1.00 | 1.00 | 5.00 | 0.21 |
| Eficiencia ambiental | 0.33 | 1.00 | 1.00 | 7.00 | 0.24 |
| Proximidad a infraestructuras sociales | 0.20 | 0.20 | 0.14 | 1.00 | 0.05 |

Nota. El ratio de consistencia es de $0.07 < a 0.09$ valor máximo admisible.

El vector principal determina los pesos de los criterios, previo a un análisis de consistencia que para el caso de la presente matriz, debe ser inferior al nueve por ciento; posteriormente se realizó una combinación lineal, completando el proceso de análisis jerárquico. Los resultados se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22

Cálculo del Índice General Aplicando el método AHP en la Toma de Decisiones

| Alternativa | PCI | Confort usuarios | Eficiencia económica de tratamientos | Eficiencia ambiental | Proximidad a infraestructura social | Valoración criterios | Valoración General |
|--------------------|------------|-------------------------|---|-----------------------------|--|-----------------------------|---------------------------|
| AÑO2 | 80 | 0.27272 | 0.49806 | 0.50616 | 0.25 | 0.5 | 0.37493 |
| AÑO3 | 76 | 0.27272 | 0.28859 | 0.16548 | 0.25 | 0.21 | 0.24918 |
| AÑO4 | 72 | 0.27272 | 0.09938 | 0.15296 | 0.25 | 0.24 | 0.20644 |
| AÑO5 | 68 | 0.181818 | 0.11395 | 0.17539 | 0.25 | 0.05 | 0.16943 |
| | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

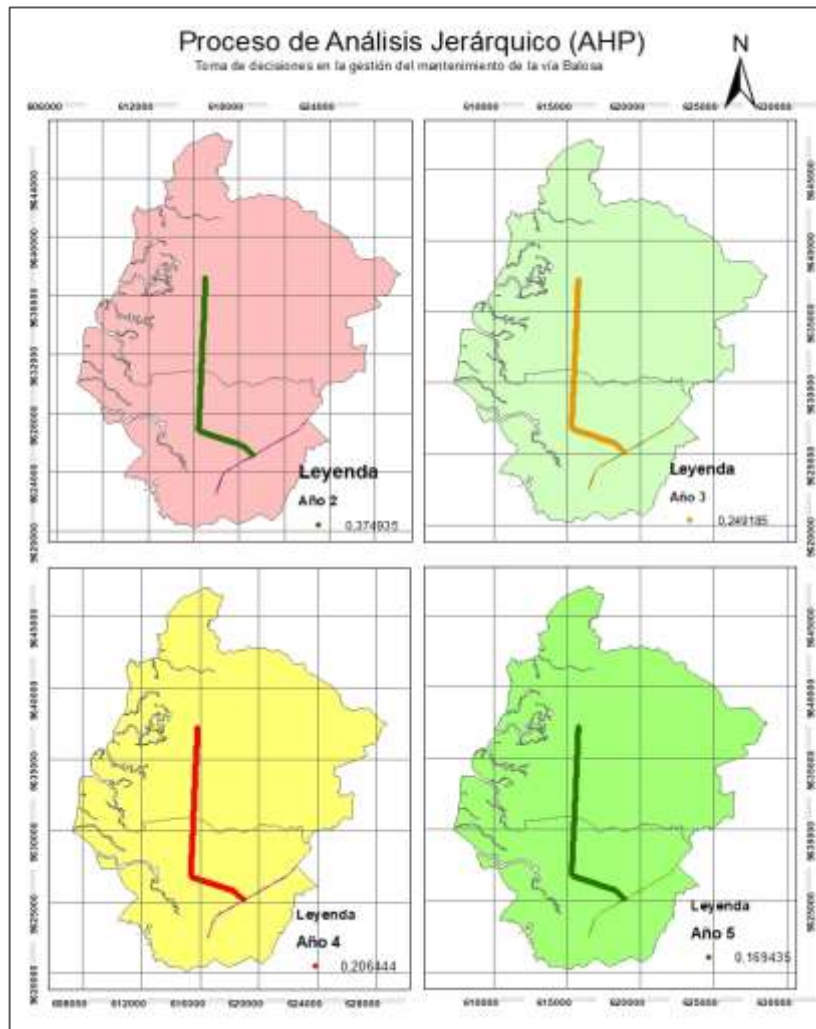
Nota. Normalización de criterios por la suma.

En el contexto del sistema de información geográfica, para alcanzar el objetivo planteado en la toma de decisiones, la evaluación multicriterio se realiza a partir de capas de mapas en formato raster; que se agregan para obtener un único mapa de resultado como apoyo a la toma de decisiones, para planificar las actuaciones de mantenimiento. Este proceso facilita el análisis de diferentes variables y la combinación de ellas, para obtener varias alternativas de tratamientos, así como, el año de vida útil adecuado para aplicar el mantenimiento preventivo.

En la Figura 36, se expone el mapa correspondiente al análisis del vector de valoración jerárquica correspondiente a los años: dos, tres, cuatro y cinco. Este mapa temático, expone los pesos de valoración general basado en los criterios de confort; eficiencia económica del tratamiento; eficiencia ambiental, considerando las emisiones de CO₂; la cercanía a los centros educativos; así como, la propuesta de intervenciones preventivas.

Figura 36

AHP para la Toma de Decisiones en la Gestión de Mantenimiento de la Vía Balosa



En este contexto los resultados permitieron tomar la decisión de programar los tratamientos preventivos de manera sostenible; la primera intervención se realizará en el año dos, por tener el índice de mayor prioridad; en este caso el tratamiento será de baja emisión de CO₂, de menor costo y menores molestias a los usuarios, debido a la atención preventiva de la condición del pavimento.

Si consideramos la aplicación de tratamiento para el año cinco de vida útil, las acciones ya no serían preventivas, sino, correctivas, esto generará mayor impacto ambiental y los costos se maximizan; así como, se incrementaría las molestias a los usuarios por la presencia de deterioros no atendidos oportunamente.

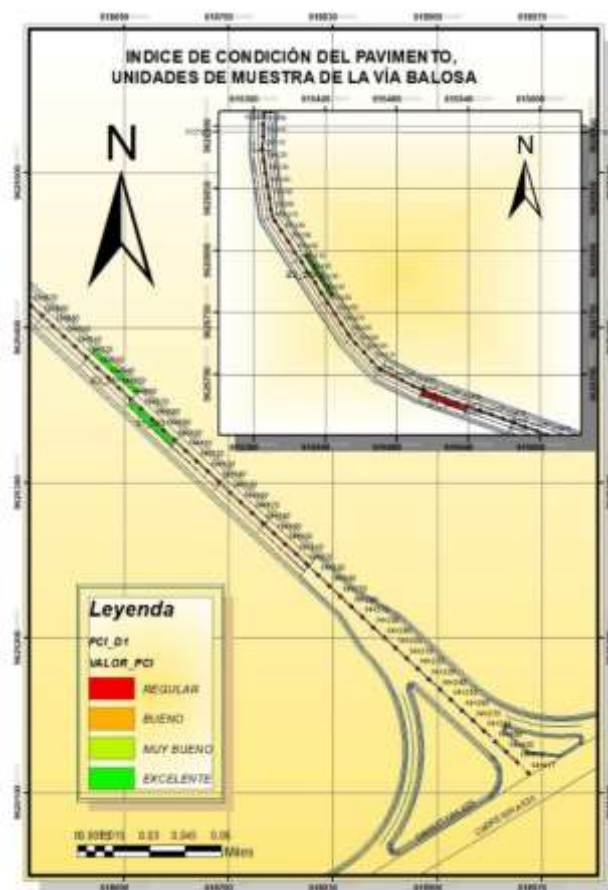
3.7 Retroalimentación, Actualización de datos

La aplicación del sistema de información geográfica facilitó el registro de datos espaciales y alfanuméricos del proyecto de ampliación de la vía Balosa; los datos espaciales contienen datos vectoriales georreferenciados sobre el eje de la vía, carriles, tramos a ser evaluados, a estos elementos geométricos se vincula datos alfanuméricos como información sobre la condición predictiva del pavimento, tráfico, acciones de tratamiento, criterios para toma de decisiones como: emisiones de CO₂, tipos de tratamiento, costos de tratamiento, infraestructura social, y otros.

En la Figura 37, se muestra un ejemplo de registros de valores de PCI, en tramos que presenten fallas en el pavimento, una vez que esté en operación la vía Balosa. Además, se propone un registro de los tratamientos que se realicen a estos deterioros.

Figura 37

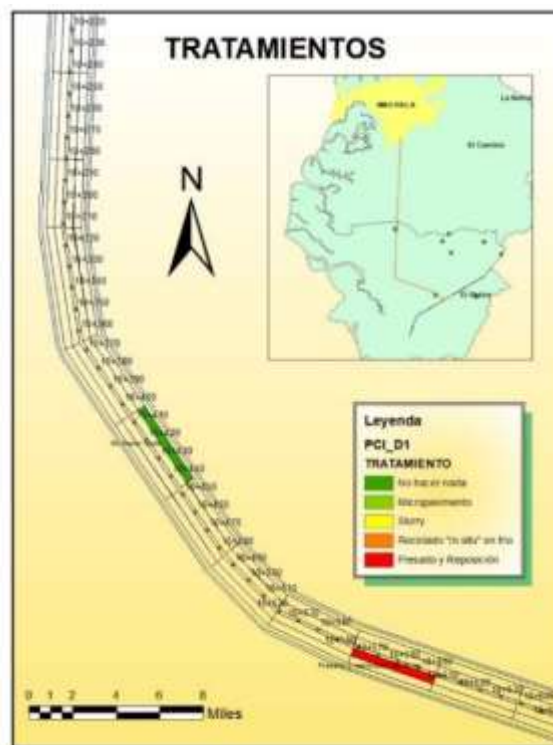
Mapas por Índice del Estado del Pavimento



En la Figura 38, se expone las acciones correctivas que se utilizará para resolver el problema de deterioros cuando se presenten. Esta herramienta se usará cuando entre en operación la vía. El modelo de mantenimiento propuesto, permitió elaborar mapas de análisis multiatributo para la toma de decisiones; facilitando la planificación del mantenimiento preventivo y garantizar una eficiente condición operativa de la vía.

Figura 38

Mapas por Eventos de Intervención de Mantenimiento



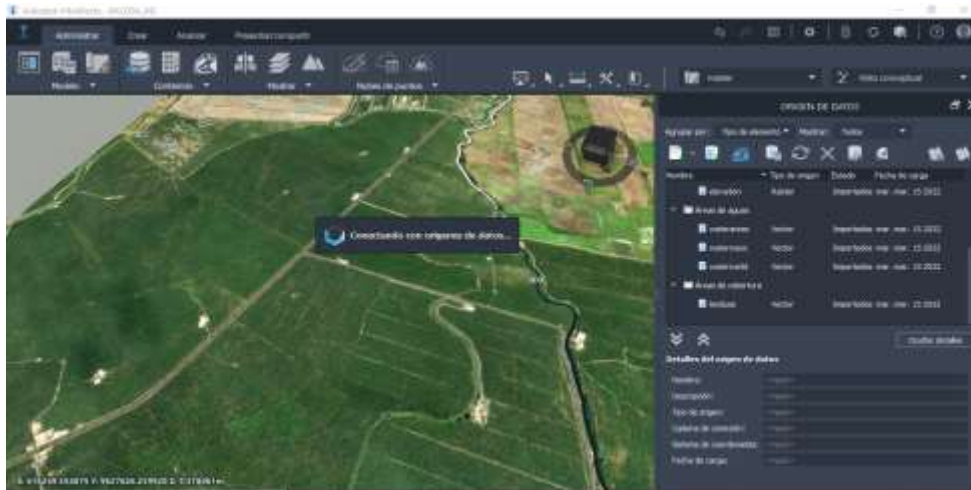
3.8 Modelo en Infraworks.

En este software Infraworks del sistema BIM se importa la información georreferenciada trabajada en ArcGIS, para visualizar de forma integrada todos los datos inherentes al proyecto. En la Figura 39, se muestra la imagen del proceso de importación de los datos de la geodatabase de GIS mediante la opción origen de datos del programa Infraworks. También se puede integrar utilizando la opción ArcGIS Online, lo datos se transfieren en formato *raster* o en vector. Además se puede realizar este proceso desde ArcGIS a Infraworks; en las dos opciones de transferencia de datos de la vía Balosa, permite una

actualización inmediata del inventario, en el caso de realizarse modificaciones en el modelo. En el Anexo O, se muestra otras áreas del modelo en Infracworks.

Figura 39

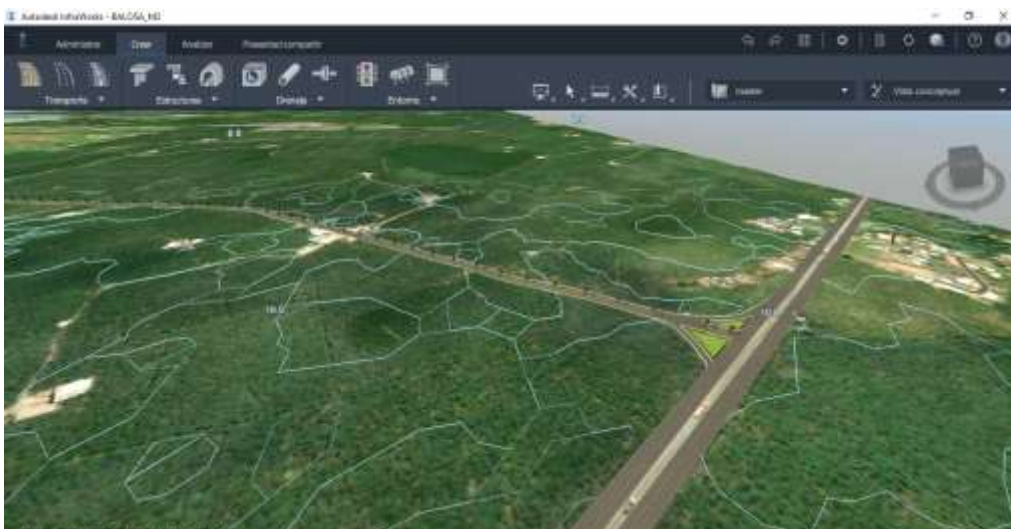
Integración de datos de GIS a Infracwork, software del sistema BIM



En la Figura 40, se expone la sección de la intersección de la vía Balosa con la Troncal E25, una vez que se actualizaron los datos georreferenciados en el modelo en Infracworks.

Figura 40

Intersección de la vía Balosa con la Troncal E25



Además en la Figura 41, se observa el acceso al puente sobre el río Motuche y los tramos de vía con cuatro carriles. En la Figura 42, se expone una panorámica del área del río.

Figura 41

Ingreso al puente sobre el rio Motuche

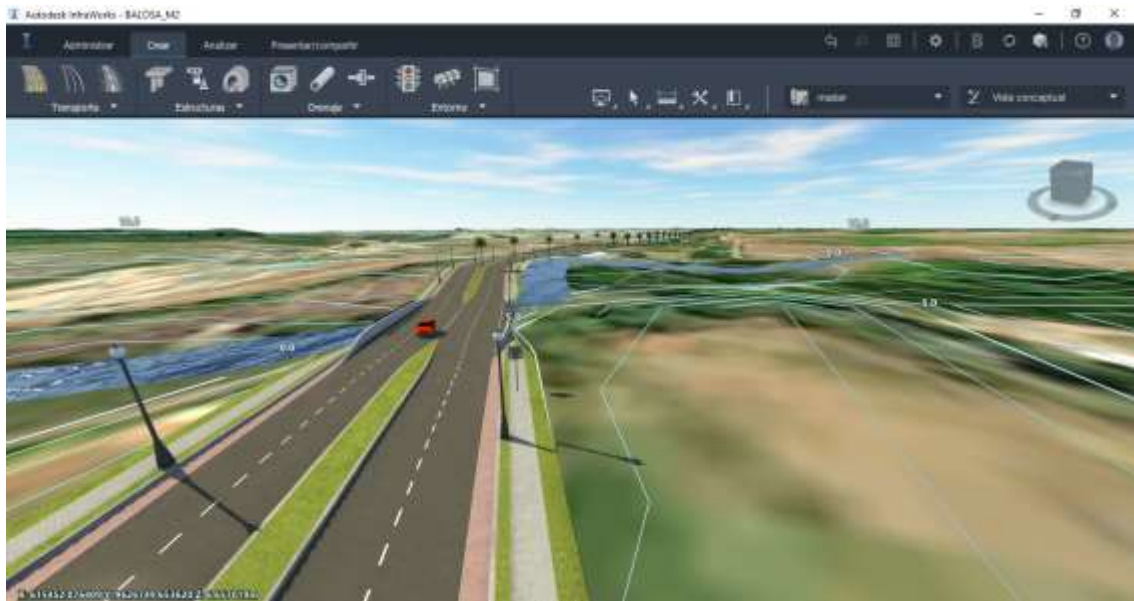
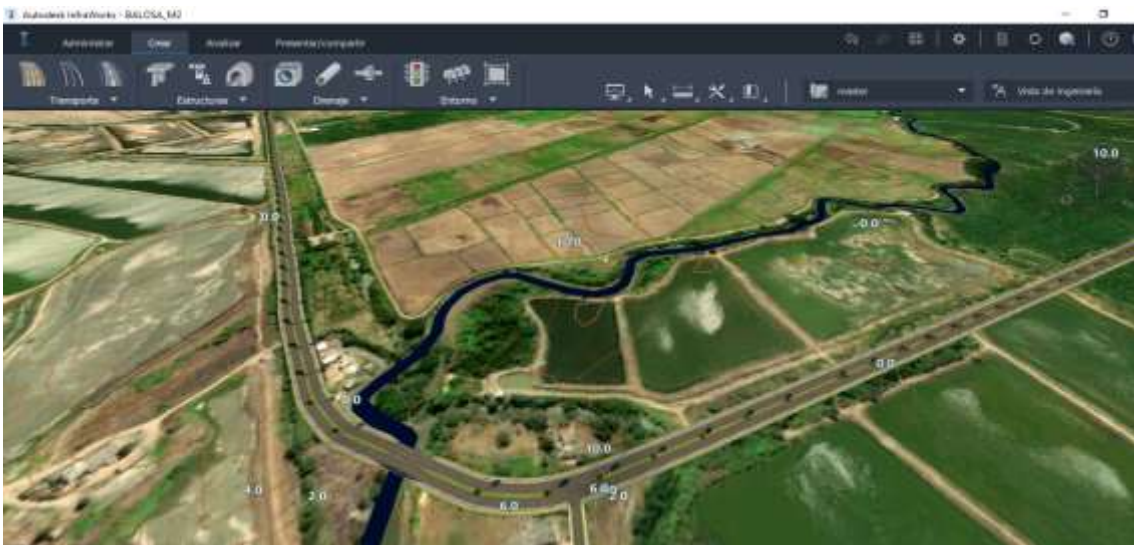


Figura 42

Área del puente sobre el rio Motuche



CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Discusión de resultados

A partir de los resultados encontrados, el modelo de mantenimiento sostenible de pavimentos flexibles nos ha permitido constatar que es aplicable para las vías de primer orden. Se elabora modelos de predicción del comportamiento del pavimento durante su vida útil basados en los datos de las características físicas de la vía, así como, del estudio de tráfico registrado en una geodatabase. A partir de estos resultados, se establece los tipos de tratamiento que se pueden aplicar. Para tomar la decisión de cuando hacerlo y qué puntos son prioritarios, se modela considerando criterios de sostenibilidad.

Los resultados nos muestran las condiciones actuales de las formas de gestionar la infraestructura vial. En la provincia de El Oro, así como en todo el país, no existe un sistema de gestión de infraestructura vial como lo sostiene Flintsch (2019) y Amador-Jimenez & Serrano (2017). Asimismo, no se dispone de una base de datos espaciales de fácil acceso a la información histórica de los impactos negativos sobre los pavimentos y las correspondientes acciones de mantenimiento realizadas. Esto genera un inadecuado análisis de las variables que intervienen en la elaboración de modelos que faciliten la toma de decisiones para un buen manejo de los recursos.

De acuerdo a lo manifestado por los técnicos del Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial El Oro y del Ministerio de Transporte y Obra Pública en El Oro, los datos históricos de los mantenimientos de las vías se han registrado en documentos impresos y en archivos digitales de extensión .docx (Word), .xlsx (Excel) y .mpp (Microsoft Project). No existe una base de datos georreferenciada ni un entorno virtual de trabajo colaborativo. Hasta el cierre de esta investigación, no se evidenció registro de la información en una base de datos construida en *GIS*, herramienta informática que según Adeleke et al. (2015) da versatilidad en el análisis de datos y facilita la selección de la estrategia adecuada del mantenimiento del pavimento de las vías de primer orden. Es decir, es capaz de gestionar y analizar la información georreferenciada de forma eficiente.

Existen datos georreferenciados de la red vial de la provincia de El Oro, trabajados desde las Instituciones de Educación Superior del Ecuador y del Instituto Geográfico Militar. Estos datos se integraron en la geodatabase del modelo, junto a aquellos generados en esta investigación mediante recursos propios. Esta información está relacionada a los elementos geométricos de la vía, las dimensiones de las capas de pavimento, TPDA, ESAL, PCI de los modelos de predicción, tipos de tratamiento, emisiones de CO₂ y costos en función del tipo de tratamiento, distancias a los centros educativos, y otros datos requeridos para definir los modelos de toma de decisiones.

Para robustecer el sistema convencional de levantamiento de datos, se logra convertir datos digitales en otros formatos con el uso de GIS que se integran a un entorno colaborativo de trabajo común denominado BIM. De acuerdo a Bermejo García (2018), esta plataforma permite crear y gestionar infraestructura a lo largo de todo el ciclo de su vida útil, centralizando toda la información en un modelo digital construido por el aporte de todos los agentes que participan en el proyecto y que desempeñan distintos roles. En este contexto, Thomas Tschickardt (2019) afirma que el uso del BIM reduce el porcentaje de complicaciones alrededor de la información que se puede analizar y utilizar de manera integral. En consecuencia, este entorno de trabajo, reduce el tiempo de ejecución, incrementa la productividad y eleva la calidad de cooperación entre todas las áreas del proyecto.

La aplicación de GIS disminuye los tiempos de elaboración del modelo, el mismo que se puede visualizar en mapas en formato vectorial y raster. También facilita la interacción con el software Infracore del entorno BIM. En esta etapa del modelo, este software permite visualizar la vía y todos sus componentes geométricos, así como su condición física. La selección idónea de los tipos de tratamiento y los criterios aplicados, permite conservar la vía en niveles de PCI mayores a 80, de tal manera, que se garantiza las condiciones del pavimento que brindan la circulación eficiente de los vehículos como se aprecia en la Figura 34.

Además, la aplicación del GIS en el proceso de la elaboración de este modelo y la exportación de datos al entorno BIM mediante Infracore, aseguran un proceso automatizado y sistemático en un entorno colaborativo durante la vida útil de la vía. Este

trabajo conexas facilita la gestión de la información que enriquecerá los datos de las características y de las condiciones operativas de la vía, debidamente registradas en una geodatabase y a la vez en el BIM. Esto puede ser utilizada en cualquier momento para realizar simulaciones de: tráfico, inundaciones, movilidad, así como, modificaciones de los elementos geométricos, si las condiciones futuras así lo requieren.

4.2 Comparación con otros modelos

El modelo de mantenimiento sostenible de pavimentos flexibles de la vía Balosa, se constituye de elementos a nivel estratégico (objetivos y políticas); así como, a nivel de proyecto (inventario, evaluación, acciones de mantenimiento, retroalimentación). Además, se recomienda su integración a un modelo a nivel de red.

Como primer elemento se propone los objetivos y las políticas para el plan de mantenimiento sostenible, donde se plantea las consideraciones sociales, económicas y ambientales. Los planteamientos a nivel estratégico coinciden con lo propuesto por Pellicer Armiñana et al. (2020). Sin embargo, no se analizó la parte del financiamiento que si se considera en el Sistema Integral de Mantenimiento Eficiente de Pavimentos Urbanos (SIMEPU). En este contexto, se toma de referencia la propuesta de Hafez & Ksaibati (2021), que considera como los objetivos de su investigación los siguientes: maximizar el rendimiento durante la vida útil del pavimento y minimizar los costos de mantenimiento. Para Hadjidemetriou et al. (2020) es necesario disponer de un sistema de gestión de pavimentos que incluya defectos, estrategias de reparación, causas y tratamiento, en un lenguaje común y una Web de acceso abierto. Para Almuhanha et al. (2018), es importante las acciones sistemáticas para conseguir un mantenimiento de bajo costo.

Como segundo elemento del sistema de gestión de pavimento flexible se propone un inventario registrado en una geodatabase, que se debe alimentar de manera automatizada con recursos de fácil acceso. En este caso, el levantamiento de información inicial de la vía se obtiene del registro de los datos que forman parte de la memoria de diseño y de los estudios, ambiental y de tráfico de la vía Balosa. Se plantea el monitoreo continuo de las zonas de mayor incidencia de los agentes que causan deterioro como son: las

inundaciones, lluvias, puntos de mayor intensidad de tráfico. Estas zonas fueron analizadas mediante la ponderación de criterios representados en capas raster en GIS. Asimismo se sugiere el registro de los deterioros, realizado por observación directa, utilizando un formulario de Google sencillo y/o una aplicación en macros de Excel; que posteriormente se ingresa la información a la geodatabase de GIS.

En la toma de datos se concuerda con Pellicer Armiñana et al. (2020), en lo referente al uso de tecnología de manera general. Sin embargo en la herramienta tecnológica utilizada existe una diferencia debido a los recursos que disponen los autores. Ellos utilizan redes neuronales convolucionales para la detección y cuantificación automática de los deterioros del pavimento. En relación al registro de la información, se coincide en el uso del GIS; también es aplicado por INECO en el proyecto de la Autopista A76, como lo exponen Vladovic Zupcevic et al. (2020). Al-Mansoori et al. (2020) lo utiliza en su modelo monitoreado en un mapa trabajado en ArcGIS. Los datos se registran espacialmente facilitando la ubicación geográfica de cualquier tramo de carretera, deterioro, punto de intervención de mantenimiento, entre otros.

El tercer elemento está relacionado al proceso de evaluación del pavimento. En el presente trabajo se utiliza la expresión matemática de George et al. (1989), para elaborar el modelo de predicción de deterioro del pavimento flexible; a partir de los datos de la vía relacionados a: número estructural, capacidad de tráfico y edad del pavimento (periodo de vida útil). Se comparó con el modelo de Picado Muñoz (2016) que analiza en su ecuación la edad del pavimento y se relaciona con un porcentaje de incertidumbre; y el modelo de Wu (2015) que su única variable es la edad del pavimento. El análisis comparativo de los tres modelos muestra el comportamiento de la condición del pavimento; en el caso del modelo de George et al. (1989), los valores de PCI correspondientes a un buen estado del pavimento se mantienen hasta el año cuatro y el nivel de deterioro regular se presenta a partir del año nueve con valores de PCI de 55.32. En el Modelo de Picado Muñoz (2016), para un porcentaje de incertidumbre de 85%, da como resultado valores predictivos de PCI 52.94, que reflejan una condición regular del firme en el año nueve. Sin embargo, en el modelo Wu, el estado regular se presenta a partir de 16.5 años de edad del firme.

La ecuación de George et al. (1989) se fundamenta en las variables: ejes equivalentes, número estructural y edad. A estas variables de entrada se les asigna valores, los mismos que se calculan a partir del TPDA del estudio de tráfico y utilizando el método de AASHTO, y se relaciona con el tiempo del periodo de vida útil. Los resultados se muestran en la Figura 31. La asignación directa de los valores propios de la vía, hacen que esta ecuación sea considerada en el modelo, ya que permite una predicción del deterioro del pavimento más cercana a la realidad local. Esta particularidad se convierte en una ventaja para el modelo, sin embargo una debilidad se manifiesta en los coeficientes de correlación que podrían calibrarse utilizando datos históricos de la región.

El modelo de gestión de mantenimiento de pavimentos propuesto por Pellicer Armiñana et al. (2020), integra un proceso de evaluación de la condición actual del pavimento y de la proyección futura del mismo. Al-Mansoori et al. (2020), consideran los datos existentes de la condición del pavimento para calcular el PCI y aplica GIS a nivel de proyecto para el registro de cada sección de pavimento con la predicción de la condición futura. Para Almuhanha et al. (2018), determina el PCI actual y modela los deterioros futuros utilizando el software PAVER 6.5.7. En este trabajo se utiliza el modelo de predicción de la condición del pavimento a partir de la ecuación de George et al. (1989) y se aplica GIS en el registro y análisis de datos.

El cuarto elemento analizado lo integran las acciones de mantenimiento, en el presente trabajo se propone acciones preventivas como parte de los objetivos y políticas. Sin embargo, se ha considerado las posibles acciones correctivas de ser necesarias. En el mantenimiento preventivo se sugiere utilizar micropavimento tipo III, que tiene una vida útil de 4 a 7 años, genera $1.51 \text{ Kg CO}_2/\text{m}^2$ y es aplicado para valores de $\text{PCI} > 80$; así como, *Slurry* que su vida útil está en el rango de 2 a 3 años, genera $0.76 \text{ Kg CO}_2/\text{m}^2$ y se aplica para valores de $\text{PCI} > 80$. En el caso de requerirse acciones correctivas para valores de PCI en el rango $40 < \text{PCI} < 80$, se sugiere aplicar materiales de baja emisión de CO_2 como fresado y reposición de firme que genera $6.91 \text{ Kg CO}_2/\text{m}^2$.

Los modelos de Torres Machí (2015) y Espinoza Valarezo (2018), consideran los materiales de menor emisión de CO_2 por m^2 para minimizar los impactos ambientales por

las acciones de mantenimiento, en relación al análisis de este indicador; sin embargo existe otros criterios que pueden ser considerados para mitigar los impactos ambientales.

Los tipos de materiales sugeridos para el mantenimiento preventivo producen un incremento de vida del pavimento, estos valores se grafican en la curva de comportamiento de la condición del pavimento para facilidad del análisis como se aprecia Figura 34. Según Giustozzi et al. (2011), la aplicación del tratamiento detiene el deterioro del pavimento en función de su vida útil. Torres Machí (2015), sostiene que la efectividad del tratamiento se reduce al 50% cuando se aplican de manera repetitiva, se basa en los estudios realizados por Wei y Tighe (2004) y Giustozzi et al. (2011), quienes limitan el número de tres aplicaciones del mismo tratamiento.

Como quinto elemento se propone un modelo de toma de decisiones utilizando el aporte matemático de Tavakoli et al. (1992), analizando año a año durante los cinco primeros años de vida útil del pavimento, intervienen como variables el PCI correspondiente al modelo de predicción de deterioro de George et al. (1989); asimismo los valores de los factores: tráfico, clase funcional, de ruta, de mantenimiento aplicado. Se calcula el valor del índice de prioridad (PI) para identificar el periodo que requiere la atención prioritaria de mantenimiento preventivo. En este análisis, se puede tomar la decisión de realizar la intervención preventiva en el año dos, cuando se presenta un valor de PCI 80.23. El cálculo y representación gráfica de este modelo se realiza en *GIS*.

Se elaboró otro modelo de toma de decisión, en esta ocasión aplicando el método de *Analytic Hierarchy Process* (AHP), propuesto por Saaty (1987). Los criterios para el análisis son: confort usuarios, eficiencia económica de los tratamientos, eficiencia ambiental tomando en consideración las emisiones de CO₂ y proximidad a infraestructura social. El análisis corresponde al los años dos, tres, cuatro y cinco, el año uno no se lo consideró por el valor de PCI inicial correspondiente a un estado muy bueno por ser una vía nueva. Se calcula el índice de valoración general que nos permite decidir por el periodo adecuado para aplicar el mantenimiento preventivo. En este caso, también se recomienda el año dos para la intervención preventiva. Este modelo se realiza aplicando *GIS* y las herramientas de multicriterio a partir de capas de formato raster; obteniendo

como resultado un mapa temático con los índices generales de valoración que sirven de apoyo a la toma de decisiones como se aprecia en la Figura 36.

En el modelo de Tavakoli no se puede integrar directamente las variables que inciden en el ambiente como las emisiones de CO₂ analizadas en este trabajo. Sin embargo, el modelo elaborado a partir del análisis multiatributo, permite hacer evaluaciones de variables que miden impactos ambientales; así como, diferentes criterios que el investigador considere aplicar en su estudio. Al mismo tiempo, los resultados de los dos modelos nos orientan a tomar la decisión de planificar acciones de mantenimiento preventivas en el mismo año del periodo de vida útil. No obstante, la decisión del tipo de tratamiento a utilizar es facilitada por el modelo multiatributo. Igualmente los dos modelos se calculan y grafican en GIS. Finalmente se decide adoptar el modelo de toma de decisiones realizado mediante el método AHP.

Autores como Pellicer Armiñana et al. (2020), realiza un análisis de optimización multiobjetivo con algoritmos heurísticos, considerando criterios de intensidad de tráfico, costos e impactos ambientales del mantenimiento, así como la cercanía a puntos de interés. Al-Mansoori et al. (2020), utiliza el *GIS* para seleccionar la alternativa más eficiente en términos de costos mínimos para el mantenimiento y rehabilitación de la vía. Espinoza Valarezo (2018), plantean criterios técnicos, económicos ambientales y sociales valorados de manera cuantitativa combinada con el método SAW que permite establecer anualmente un ranking de priorización de las vías, que deben recibir mantenimiento. Villegas Flores (2009), utiliza un árbol de decisión donde analiza criterios como el costo de mantenimiento, emisiones CO₂, materiales reciclados, consumo de energía, agua, materia prima utilizada, entre otros.

Existe coincidencia, con los autores citados anteriormente, en relación a los criterios de sostenibilidad, la utilización del GIS y establecimiento de un ranking de prioridad. Sin embargo, la herramienta de toma de decisiones es diferente. En este trabajo se utiliza el análisis multiatributo con el método AHP para planificar acciones preventivas que minimicen impactos económicos, sociales y ambientales. Además, una vez que esté operativa la vía se podrá elaborar un ranking de priorización de los tramos de la vía, si se presentarán deterioros en el pavimento que requieran acciones correctivas.

De manera general, el modelo de gestión de pavimentos flexibles propuesto en esta investigación toma en consideración los pilares de sostenibilidad para desarrollar cada componente; iniciando por el planteamiento de objetivos y políticas sostenibles, la automatización de la toma de datos, los procesos de evaluación y predicción de la condición del pavimento, el monitoreo continuo de los puntos críticos de la vía que pueden sufrir deterioros prematuros, el análisis de criterios económicos, sociales y ambientales para la toma de decisiones. Todos los componentes integrados en un entorno de trabajo colaborativo y georreferenciado, permite gestionar de manera eficiente y responsable los recursos disponibles para mantener la vía en óptimas condiciones de servicio durante su vida útil.

La sostenibilidad de la propuesta se fundamenta en las consideraciones planteadas en el Informe *Brundtland* de 1987, donde se define que el desarrollo sostenible permite satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones del futuro de satisfacer sus propias necesidades. En palabras de Ureña (2020) las infraestructuras viales son sostenibles cuando se hace uso responsable de los recursos finitos del planeta y cumple con las expectativas y necesidades de la población de nuestras ciudades. Asimismo, expresa que la integración BIM-GIS permite desarrollar proyectos cada vez más complejos de manera sostenible, en virtud del trabajo interconectado que se realiza en menos tiempo, con menos riesgo y menor inversión. En palabras de Villegas Flores (2009), el objetivo esencial del desarrollo sostenible es optimizar el uso de los recursos en cualquier actividad, evitando cualquier gasto injustificado. Al integrar la geodatabase de GIS en Infracore, se fortalece el trabajo conexas para la etapa de mantenimiento de la vía, en virtud de la gestión automatizada de la información que facilita el análisis y toma de decisiones para seleccionar adecuadamente el periodo y tipos de materiales para la intervención preventiva, que permita conservar las condiciones de eficiencia de la vía.

La sostenibilidad se relaciona con factores que afectan el medioambiente durante el ciclo de vida del proyecto, así como también se tiene en cuenta los aspectos económicos y sociales. En la elaboración del modelo de toma de decisiones, se calcula la eficiencia ambiental considerando el criterio de emisiones de CO₂ de los materiales utilizado en los

tratamientos, la eficiencia económica analizando el costo del material utilizado en el tratamiento. Otro criterio considerado es la cercanía a centros de interés social, además se considera el confort de los usuarios.

4.3 Limitaciones del modelo

El modelo de gestión de mantenimiento es aplicable a la vía Balosa como una carretera de primer orden nueva. Permite elaborar un buen plan de mantenimiento que incluye una programación sistemática de acciones de intervención fundamentado en los aportes técnicos de los modelos de predicción de deterioros y de toma de decisiones. Al no disponer de información histórica de deterioros y de acciones de mantenimiento en vías de primer orden en la provincia de El Oro, limita el uso de expresiones matemáticas que representen la realidad local en temas de condición de pavimentos flexibles. Asimismo, no se dispone de valores de los factores locales relacionados a la función, al tráfico, al tipo de mantenimiento para aplicarlos en la ecuación de Tavakoli, el análisis de Saaty, entre otros.

La limitación de uso de los softwares, en relación a la no disponibilidad de licencias de pago por motivos económicos, dificulta el trabajo conexas en tiempo real entre BIM y GIS. Sin embargo, por gestión personal, se adquirió licencias de estudiante de Autodesk, de los siguientes softwares de entorno BIM: Civil 3D, Autocad e Infracore. Estas licencias no permiten el acceso a todas las funciones del entorno BIM. Para modelar en BIM se importó desde ArcGIS los datos vectoriales, logrando visualizar la vía Balosa con sus componentes geométricos y las marcas que identifican las áreas de posibles deterioros, identificados por color según la escala de los valores de PCI de la norma ASTM D6433.

La falta de cualificación de los técnicos en temas de conservación de vías, es un limitante para la elaboración del sistema de gestión de mantenimiento de la infraestructura vial; en áreas como la práctica profesional, así como en el ámbito académico, ésta es una asignatura pendiente en la carrera de pregrado como en los programas de postgrado.

4.4 Líneas de investigación futura

Las líneas de investigación que pueden ser consideradas se orientan hacia el estudio de tecnologías de la información, que puedan aplicarse en la toma, identificación y cálculo de deterioros de pavimentos, para realizar un modelo de predicción más cercano a nuestra realidad local. El trabajo es colaborativo entre varias disciplinas. Entre estas tecnologías tenemos: inteligencia artificial (redes neuronales), geomática, teledetección, entre otras.

Otros temas de estudio se relacionan a metodologías de bajo costo para elaborar los inventarios de la red vial, cumpliendo con procesos de aseguramiento y gestión de la calidad de los datos.

La resiliencia en la ingeniería vial, es tema de atención prioritaria en la actualidad, que debe ser investigado para conseguir obras capaces de resistir, absorber, acomodar, adaptarse transformarse y recuperarse de los impactos negativos en un tiempo oportuno y de manera eficiente, a través de la gestión de riesgo.

CONCLUSIONES

Son parte de las conclusiones de este trabajo las respuestas dadas a cada pregunta que se ha planteado en la investigación mediante el cumplimiento de cada objetivo específico.

En respuesta al objetivo específico 1: Examinar estudios de mantenimiento sostenible de pavimento en función del uso de la tecnología, que garantice la eficiencia de las vías de primer orden.

En la investigación se examinó estudios de mantenimiento sostenible que utilizan tecnología como el *Geographic Information Systems (GIS)* y *Building Information Modeling (BIM)*. El análisis documental de estas investigaciones fortaleció el marco teórico del tema investigado. De los 38 artículos revisados, nueve aportan sobre evaluación y modelos de predicción en los sistemas de gestión de pavimentos; 12 describen los modelos de toma de decisiones considerando diferentes criterios (tres aportan sobre emisiones de CO₂). También 17 artículos corresponden a modelos de gestión de pavimentos, de los cuales nueve utilizan GIS, tres integran GIS y BIM y cinco aplican otras tecnologías.

La revisión documental de los compromisos internacionales de sostenibilidad a los cuales está suscrito el Ecuador, permitió la fundamentación teórica del modelo considerando los criterios ambientales, sociales y económicos. A partir de estos aspectos, se realizó el modelo de toma de decisiones aplicando el método AHP para definir las acciones de mantenimiento preventivo haciendo un uso responsable de los recursos. No obstante, los accesos limitados a bibliotecas en línea dificultaron el proceso e incrementaron el tiempo de ejecución de la investigación

En respuesta al objetivo específico 2: Detallar las características técnicas de la vía Balosa.

En este trabajo se detalló las características técnicas de la vía Balosa. A partir de la revisión de las especificaciones técnicas, memoria de diseño; así como las memorias de

estudios ambientales y de tráfico, se describe sus características: Es una vía de primer orden con velocidad de diseño de 80km/h; tiene cuatro carriles, dos por sentidos de circulación, el ancho del carril es de 3.65 m; su longitud es de 14.27 Km; su pendiente longitudinal está en el rango de 2% a 6 %. El tráfico futuro es de 50816 y su sección transversal está constituida por una capa de rodadura de 0.10 m, la base clase I de 0.20 m, la subbase clase II de 0.25 m y una capa de mejoramiento de 0.35 m. El análisis de las características geométricas de la vía, de la estructura del pavimento, del TPDA y de las normativas de mantenimiento, facilitaron la descripción del proyecto de ampliación de la vía y la construcción del modelo de gestión de mantenimiento sostenible de pavimento flexible. A pesar del limitado acceso a las normativas internacionales, por ser de pago, se pudo cumplir con el objetivo planteado.

En respuesta al objetivo específico 3: Diseñar un modelo de gestión de mantenimiento sostenible de pavimento de la vía Balosa, mediante la interoperabilidad del BIM y GIS.

En esta investigación se diseñó un modelo de mantenimiento sostenible de pavimento flexible mediante la integración BIM y GIS. A partir de los datos técnicos registrados en la memoria de diseño se elaboró el modelo virtual del trazado geométrico en Infracore, que es un software BIM. La geodatabase con el registro de los datos que caracterizan la vía se la hizo en ArcGIS. Los modelos de predicción de deterioro se elaboraron con las contribuciones de tres autores. Se seleccionó el modelo realizado a partir de la ecuación de George et al., publicada en 1989. El valor de PCI obtenido para los primeros cinco años varía entre 70 (muy Bueno) y 90 (excelente). Los puntos críticos de monitoreo continuo para control de la condición del pavimento, obtenidos a partir del análisis multicriterio realizado con la herramienta de superposición ponderada de ArcGIS, se ubican en las cercanías de los centros poblados, centros educativos, área de acceso al puente Motuche.

A partir de los aportes de Tavakoli y utilizando el método de multicriterio AHP, se realizó dos modelos de toma de decisiones en el sistema GIS. El análisis se hizo para los primeros cinco años. Los resultados de estos modelos permitieron definir que la primera intervención con mantenimiento preventivo se realice en el año dos, para valor de PCI 80.23. Se puede aplicar slurry que tiene una vida útil de dos a tres años y emisiones de

0.76 Kg CO₂/m². La siguiente intervención se debe considerar hacerla para el año cuatro y en este caso utilizar micropavimento, cuya vida útil es de cuatro a siete años y tiene emisiones de 1.51 Kg CO₂/m². Una siguiente intervención se puede programar para el año 10. Sin embargo, es importante el monitoreo continuo de la vía durante su vida útil, de esta manera se puede tomar acciones en el caso de presentar cambios importantes en la condición del pavimento. En este contexto, el modelo permite manejar responsablemente los recursos y garantizar las condiciones eficientes para la circulación de los vehículos.

Con relación a la integración de BIM y GIS, el modelo tiene límites relacionados con el acceso a todas las bondades de la interoperabilidad del sistema de trabajo colaborativo en tiempo real. Esto se debe a no tener licencias de pago para el uso del entorno BIM, así como del ArcGIS Pro o ArcGIS online. Sin embargo, el trabajo se realizó en Infracore como un visor del entorno BIM, con licencia de estudiante. Se exportaron los datos de la geodatabase de GIS al Infracore de BIM y viceversa.

En respuesta al objetivo general: Proponer un modelo de gestión de mantenimiento sostenible de pavimento, utilizando Building Information Modeling (BIM) y Geographic Information Systems (GIS), para el mejoramiento de la eficiencia de las vías de primer orden

Una oportuna intervención para mejorar la eficiencia de la vía, requiere la utilización de un modelo o sistema de gestión de mantenimiento sostenible de pavimentos, donde se programe de forma adecuada y sistemática las acciones necesarias para integrar cada componente que da forma al modelo; apoyado en las herramientas tecnológicas como el *Building Information Modeling (BIM)* y *Geographic Information Systems (GIS)*, que permite un trabajo conexo, dinámico y responsable. Este ayuda a encontrar una forma eficiente y responsable del uso de los recursos destinados al mantenimiento de las vías para garantizar el confort y seguridad a los usuarios.

RECOMENDACIONES

Mantener la base de datos actualizada y alimentada con nuevas estrategias de mantenimiento sostenibles e innovadoras a partir de nuevas investigaciones exploratorias, descriptivas correlacionales y/o explicativas realizadas por la institución de educación superior, por instituciones públicas y privadas o por trabajos de cooperación entre ellas. Indagar y profundizar en los sistemas de información geográfica y su aprovechamiento en la gestión de información LiDAR, en el uso de drones, inteligencia artificial para la identificación de deterioros. La continuidad de aplicación del modelo con las acotaciones indicadas es muy importante para tomar decisiones oportunas presentes y futuras que garanticen las condiciones de eficiencia de la vía.

Para garantizar la eficiencia en la gestión de la información y fortalecer el proceso de toma de decisiones, se debe mantener actualizada la Geodatabase haciendo uso de las herramientas tecnológicas para el levantamiento de información de los deterioros, en tiempo real, si el recurso tecnológico disponible lo permite; caso contrario se puede utilizar los formularios elaborados en macros de Excel propuestos y seguidamente registrar los datos en la Geodatabase. Además se debe fortalecer los procesos de capacitación en el uso de estas tecnologías, a los técnicos de las instituciones públicas.

Integrar BIM y GIS en todas las etapas del proyecto, para dar un nuevo enfoque al trabajo colaborativo entre estos dos sistemas, permitiendo una participación activa de cada actor del proyecto. Mejorar los tiempos de programación de la obra, reducir costos, disminuir el riesgo de duplicidad o pérdida de información, fortalecer la toma de decisiones, minimizar los posibles impactos económicos, sociales y ambientales; cumpliendo con el propósito de mantener la vía en condiciones de eficiencia operativa durante su vida útil.

Para que el modelo de gestión de mantenimiento sostenible sea eficiente, es necesario hacer un uso responsable de los recursos disponibles, tomando decisiones oportunas e idóneas, considerando los impactos ambientales y cumpliendo con las expectativas de los usuarios. El trabajo debe hacerse en un entorno virtual, colaborativo, dinámico, garantizando procesos de calidad.

BIBLIOGRAFÍA

- Aceves-Gutierrez, H., Lopez-Chavez, O., Mercado-Ibarra, S. M., & Arevalo-Razo, J. L. (2020). Huella de carbono de una pavimentación con la metodología del ACV y SIMAPRO. *Revista de Energías Renovables*, 4(12), 8–20. <https://doi.org/10.35429/JRE.2020.12.4.8.20>
- Adeleke O., O., Kolo S., S., Odumosu J., O., Abdulrahman H., S., & Atilola B., Y. (2015). *Application of GIS as Support Tool for Pavement Maintenance Strategy Selection* (Institución De Investigación De Construcción Y Carreteras De Nigeria (Ed.); Pp. 1–13). <https://bit.ly/3TPWF6v>
- Al-Mansoori, T., Abdalkadhun, A., & Al-Husainy, A. S. (2020). A GIS-enhanced pavement management system: A case study in Iraq. *Journal of Engineering Science and Technology*, 15(4), 2639–2648. <https://www-scopus-com.basesdedatos.utmachala.edu.ec>
- Almuhanna, R. R. A., Ewadh, H. A., & Alasadi, S. J. M. (2018). Using PAVER 6.5.7 and GIS program for pavement maintenance management for selected roads in Kerbala city. *Case Studies in Construction Materials*, 8(December 2017), 323–332. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.01.005>
- Amador-Jimenez, L., & Serrano, L. (2017). Pavement Management : A Service-Based Optimal Allocation Of Roads ' Interventions. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 12(6), 1096–1106. <https://doi.org/10.2495/SDP-V12-N6-1096-1106>
- ASTM International. (2007). *ASTMD 6433-07 Standard Practice for Roads and Parking Lost Pavement Condition Index Surveys*. <https://www.astm.org/d6433-20.html>
- Autodesk. (2019). Integración de BIM y GIS (p. 29). Autodesk. bit.ly/3SNbXHM
- Autodesk. (2021). *Infraworks*. <https://www.autodesk.com>
- Baena Paz, G. (2017). *Metodología de la investigación* (Grupo Editorial Patria (ed.); Tercera). <https://elibro-net.basesdedatos.utmachala.edu.ec/>
- Bañón Blázquez, L., & Bevía García, J. F. (2000). *Manual de carreteras* (Ortiz e Hi, Vol. 1). <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/1788>
- Bazlamit, S. M., Ahmad, H. S., & Al-Suleiman, T. (2017). Pavement Maintenance Applications using Geographic Information Systems. *Procedia Engineering*, 182(September 2016), 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.123>

- Bermejo García, J. B. (2018). *Aplicación de la Metodología BIM al Proyecto de Construcción de un Corredor de Transporte para un Complejo Industrial - Modelo BIM 4D Planificación* [Universidad de Sevilla]. <https://bit.ly/3DjuzcQ>
- Cal y Mayor, R., & Cárdenas Grisales, J. (1998). *Ingeniería de Tránsito, Fundamentos y Aplicaciones* (Alfaomega (ed.); Séptima). <https://bit.ly/3Dni7sm>
- Cárdenas Grisales, J. (2013). *Diseño geométrico de carreteras* (Ecoe Ediciones (ed.); Segunda). <https://basesdedatos.utmachala.edu.ec>
- Caspa Pacheco, N. A. (2020). *La política de transportes en Ecuador, 1925-1962* [Universidad Andina Simón Bolívar]. <https://bit.ly/3U4OPpa>
- Chang, C. M. (2020). Sistemas De Gestión De Pavimentos : Pavement Management Systems : Past , Present , And Future. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 19(1), 231–239. <https://bit.ly/3DLNcrl>
- Díaz-Vilariño, L., González-Jorge, H., Bueno, M., Arias, P., & Puente, I. (2016). Automatic classification of urban pavements using mobile LiDAR data and roughness descriptors, *Construction and Building Materials*. *Construction and Building Materials*, 102(1), 208–215. <https://bit.ly/3FwzOIH>
- Dirección General de Carreteras de España. (2003). Norma 6.3 IC: Rehabilitación de Firmes. In *Norma 6.3 IC: Rehabilitación de Firmes* (Issue 70 000, pp. 3–74). Orden FOM/3459/2003. <https://bit.ly/3TP6jpl>
- Espinoza Valarezo, P. A. (2018). *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* [Universitat Politècnica De València]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/115993>
- Estrada Fernández, J. A., & Sáez Villar, P. (2016). La explotación, mantenimiento y conservación de las carreteras. *Revista de Obras Publicas*, 163(3574), 37–54. <https://www-scopus-com.basesdedatos.utmachala.edu.ec/>
- Fakhri, M., & Dezfoulian, R. (2017). Application of GIS for Pavement Maintenance Prioritization Based on a New Approach at a Network Level. *Journal of Engineering Technology*, 4(2). <https://doi.org/10.5176/2251-3701>
- Fienco Jalca, M. A., Bravo Mera, B. S., Guachisaca Contento, V. E., Jaramillo Pintado, E. A., & Fienco Jalca, V. E. (2017). *Elementos Originales en el Diseño Geométrico de Carreteras* (3Ciencias (ed.)). 3Ciencias. <https://bit.ly/3Wjl0mD>
- Flintsch, G. W. (2019). *Estado de la Gestión de Activos Viales en América Latina y el*

- Caribe*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18235/0001785>
- George, K. P., Rajagopal, A. S., & Lim, L. K. (1989). Models for Predicting Pavement Deterioration. *Transportation Research Record*, 1215(1), 1–7. <https://trid.trb.org/view/308298>
- Gestión de Riesgo de Ecuador. (2021). *No Title*. Reportes de Monitoreo de Amenazas y Eventos Peligrosos. www.gestionderiesgos.gob.ec
- Giustozzi, F., Crispino, M., & Flintsch, G. (2011). Multi-attribute life cycle assessment of preventive maintenance treatments on road pavements for achieving environmental sustainability. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(1). <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0375-6>
- Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de El Oro. (2013). *Estudio de Impacto Ambiental para la ampliación y apertura de la vía Machala - Santa Rosa (Balosa)*. <https://maeeloro.files.wordpress.com/2014/03/2-eia-via-machala-santa-rosa.pdf>
- Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de El Oro. (2019). *Resumen Ejecutivo del Proyecto de Ampliación y Mejoramiento de la Vía Balosa*. Secretaría de Estudios y Proyectos.
- Hadjidemetriou, G. M., Masino, J., Christodoulou, S. E., Gauterin, F., & Brilakis, I. (2020). Comprehensive Decision Support System for Managing Asphalt Pavements. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 146(3), 06020001. <https://doi.org/10.1061/jpeodx.0000189>
- Hafez, M., & Ksaibati, K. (2021). Studying the Effectiveness of Changing Parameters in Pavement Management Systems on Optimum Maintenance Strategies of Low-Volume Paved Roads. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 147(1), 04020075. <https://doi.org/10.1061/jpeodx.0000232>
- Hajkowicz, S., & Collins, K. (2007). *A Review of Multiple Criteria Analysis for Water Resource Planning and Management*. 1553–1566. <https://bit.ly/3TPLc6L>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. B. (2014). *Métodos y Técnicas de Investigación Social* (McGraw Hill Education (ed.)). <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>
- Hirooka Koshigoe, A. S., Vargas Zanoni, F. C., Prado Silva Júnior, C. A., & Barbosa Fontenele, H. (2019). Effect of variation of the average daily volume and traffic growth rate on flexible pavements performance. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 27(1), 58–68. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052019000100058>

- INAMHI. (2021). *No Title*. Red de Estaciones Meteorológicas e Hidrológicas. <http://www.inamhi.gob.ec/>
- Instituto Nacional de Vías. (2006). *Manual Para la Inspección Visual de Pavimentos Flexibles*. (pp. 1–56). Universidad Nacional de Colombia. <https://bit.ly/3DG7Nx5>
- International Slurry Surfacing Association. (2010a). *Norma de rendimiento recomendada para micro pavimentación A143* (ISSA A143). <https://bit.ly/3FK1zxN>
- International Slurry Surfacing Association. (2010b). *Normas de rendimiento recomendadas para slurry seal de asfalto emulsionado*. <https://bit.ly/3sHpVQM>
- Jadán, M., Carretero, P. A., & Galarza, B. (2018). Aboriginal roads connected to the Qhapaq Ñan, the Chanchan river basin, Chimborazo Province, Ecuador. *Arqueología Iberoamericana*, 40, 54–64. <https://bit.ly/3gUHf2e>
- Johnson, R. B., & Onwuegbuzie, A. J. (2004). Mixed Methods Research: A Research Paradigm Whose Time Has Come. *Educational Researcher*, 33(7), 14–26. <https://bit.ly/3FsQwZn>
- Kraemer, C., Pardillo, J., Rocci, S., Romana, M. G., Sánchez Blanco, V., & Del Val, M. A. (2003). *Ingeniería de Carreteras* (Mc Graw Hill (ed.); Primera). <https://bit.ly/3U7I6Lf>
- Llopis-castell, D., Garc, T., Montalb, L., Sanz-benlloch, A., & Pellicer, E. (2020). Influence of Pavement Structure , Traffic , and Weather on Urban Flexible Pavement Deterioration. *Sustainability*, 12. <https://doi.org/10.3390/su12229717>
- Macea-Mercado, L. F., Morales, L., & Márquez-Díaz, L. G. (2016). Un sistema de gestión de pavimentos basado en nuevas tecnologías para países en vía de desarrollo. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 17(2), 223–236. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.06.007>
- Martínez Cañamares, J. (2016). *Sistemas de Gestión de Puentes Optimización de estrategias de mantenimiento Implementación en redes locales de carreteras* [Universidad Politécnica de Madrid]. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.39436>
- Marzouk, M., & Othman, A. (2020). Planning utility infrastructure requirements for smart cities using the integration between BIM and GIS. *Sustainable Cities and Society*, 57(October 2019), 102120. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102120>
- Medina, A. (2019). Construir la República práctica: Estado, vías de comunicación e integración territorial en Ecuador, 1883-1895. *Procesos. Revista Ecuatoriana de Historia*, 0(49), 77. <https://doi.org/10.29078/rp.v0i49.770>

- Menéndez, J. R. (2003). *Mantenimiento Rutinario de Caminos con Microempresas* (Primera). Organización Internacional del Trabajo 2003. <https://bit.ly/3Wf5OXW>
- Meneses, S., & Ferreira, A. (2012). New optimization model for road network maintenance management. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 54, 956–965. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.811>
- Ministerio de Transporte Colombia. (2016). *Manual de mantenimiento de carreteras 2016*. <https://bit.ly/3UaUIBs>
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador. (2012). Volumen No. 2 - Libro A Norma para estudios y diseños viales. In *Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador: Vol. Volumen 2A* (pp. 1–382). <https://bit.ly/3Wib11c>
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador. (2013). *Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 - MTOP_Conservación Vial*. <https://bit.ly/3Wh3T4Q>
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. (2019). *Lineamientos Generales para el uso del BIM en proyectos de construcción* (No. 242–2019). https://www.mef.gob.pe/contenidos/archivos-descarga/anexo_RD007_2020EF.pdf
- Moreno Gallo, I. (2006). *Vías Romanas: Ingeniería y técnica constructiva* (Segunda). Ministerio de Fomento, Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas. <http://www.traianvs.net/index.php>
- Mysiak, J., Giupponi, C., & Rosato, P. (2005). Towards the development of a decision support system for water resource management. *Environmental Modelling & Software*, February. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2003.12.019>
- Orellana López, D., & Sánchez Gómez, M. C. (2006). Técnicas de recolección de datos en entornos virtuales más usadas en la investigación cualitativa. *Revista de Investigación Educativa*, 24, 205–222. <https://revistas.um.es/rie/article/view/97661>
- Pastor, C. (2020). El mantenimiento como herramienta para conseguir infraestructura de alta calidad y durabilidad. In *El mantenimiento como herramienta para conseguir infraestructura de alta calidad y durabilidad*. <https://doi.org/10.18235/0002140>
- Pellicer Armiñana, E., Paredes Palacios, R., Felipe Sanjuán, J., & Sánchez-Robles Bello, J. (2020). *Sistema integral para el mantenimiento eficiente de pavimentos urbanos*. <https://bit.ly/3DjQa4L>
- Pereira, L. A., Silva Júnior, C. A. P., & Fontenele, H. B. (2019). Escala visual para evaluación de pavimentos urbanos : Una validación en oficina. *Revista Ingeniería de Construcción*, 34, 45–54. <https://bit.ly/3feLg14>

- Picado Muñoz, G. (2016). Desarrollo de curvas de deterioro para pavimento flexible y factor de incertidumbre. *Revista Infraestructura Vial*, 18(31), 30–38. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/view/27762/28156>
- Pimienta Lastra, R. (2000). Encuestas probabilísticas vs . no probabilísticas. *Política y Cultura*, 13, 263–276. <https://bit.ly/3SONird>
- Reyes-Ortiz, O. J., Mejia, M., & Useche-Castelblanco, J. S. (2019). Técnicas de inteligencia artificial utilizadas en el procesamiento de imágenes y su aplicación en el análisis de pavimentos. *EIA*, 16, 189–207. <https://bit.ly/3DSwtCN>
- Ricoy Lorenzo, C. (2006). Contribución sobre los paradigmas de investigación Contribution on the research paradigms Abstract. *Educação.*, 31(1), 11–22. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=117117257002>
- Rondón Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. A. (2016). *Pavimentos: materiales, construcción y diseño* (Ecoe Ediciones (ed.)). <https://bit.ly/3sDI6Hc>
- Saaty, R. W. (1987). The Analytic Hierarchy Process-Wath it is and how it is used. *Math Modelling*, 9(3), 161–176. <https://bit.ly/3SO0Le1>
- Salviatto, V. H., Londrina, U. E. De, & Fontenele, H. B. (2021). Index for assessing the condition of flexible urban pavements based on a constructivist multicriteria analysis. *Revista Ingeniería de Construcción*, 36(2), 107–116. <https://bit.ly/3gV1Lj2>
- Santero, N. J., & Horvath, A. (2009). Global warming potential of pavements. *Environmental Research Letters*, 4. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/3/034011>
- Santos, J., Torres-Machi, C., Morillas, S., & Cerezo, V. (2020). A fuzzy logic expert system for selecting optimal and sustainable life cycle maintenance and rehabilitation strategies for road pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 0(0), 1–13. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1751161>
- Santos Preciado, J. (2020). *Sistemas de Información Geográfica* (digital). UNED. <https://bit.ly/3SJzaKR>
- Shah, Y. U., Jain, S. S., & Parida, M. (2014). Evaluation of prioritization methods for effective pavement maintenance of urban roads. *International Journal of Pavement Engineering*, 15(3), 238–250. <https://doi.org/10.1080/10298436.2012.657798>
- Silva-Balaguera, A., Daza-leguizamón, O., & Lopez-valiente, L. (2018). Gestión de pavimentos basado en sistemas de información geográfica (sig): una revisión. *Ingeniería Solidaria*, 14(26). <https://bit.ly/3T3080p>
- Siswanto, H., Supriyanto, B., Pranoto, Pasca, R., & Aviv, M. (2019). District road

- maintenance priority using analytical hierarchy process. *AIP Conference Proceedings*, 2114(June). <https://doi.org/10.1063/1.5112490>
- Solminihac, H. ., Echaveguren, T., & Chamorro, A. (2018). *Gestión de Infraestructura Vial* (Tercera). <https://bit.ly/3Ngyo70>
- Sotil Chávez, A. (2014). Propuesta de Sistema de Gestión de Pavimentos para Municipalidades y Gobiernos Locales. *Revista Infraestructura Vial*, 16(28), 13–24. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/view/14582>
- Southern African Development Community. (2003). *Guideline on Low-volume Sealed Roads* (Issue July). <https://bit.ly/3UaY0nV>
- Tavakoli, A., Lapin, M. S., & Figueroa, J. L. (1992). Pavement management system for small communities. *Journal of Transportation Engineering*, 118(2), 270–280. <https://bit.ly/3U3W80o>
- Torres Machí, C. (2015). *Optimización heurística multiobjetivo para la gestión de activos de infraestructuras de transporte terrestre* [Pontificia Universidad Católica de Chile, Universitat Politècnica de València]. <https://bit.ly/3NhZEIC>
- Tschickardt, T., & Krause, D. (2019). BIM im Verkehrswegebau am Beispielprojekt „Verfügbarkeitsmodell A 10/A 24“. *Bautechnik*, 96(3), 259–268. <https://doi.org/10.1002/bate.201800104>
- Ureña, V. (2020, November). www.autodeskjournal.com. *AutodeskJournal*. <https://bit.ly/3TQbBRS>
- Valdés Vidal, G., Pérez-Jiménez, F., & Calabi Floody, A. (2012). La Fisuración en Pavimentos Asfálticos y sus Mecanismos de Deterioro. *Revista Ingeniería de Obras Civiles*, 1(0), 27–37. <http://rioc.cl/index.php/RIOC/article/view/1.3/2>
- Vásquez, L. (2002). Pavement Condition Index (Pci) Para Pavimentos Asfálticos Y De Concreto En Carreteras. In *Ingepav* (p. 90). <https://bit.ly/3gVCzJu>
- Vera Galindo, C. (2018). *Aplicación de la Metodología BIM a un Proyecto de Construcción de un Corredor de Transporte Para un Complejo Industrial. Modelo BIM 5D Costes* [Universidad de Sevilla]. <https://idus.us.es/handle/11441/84165>
- Villegas Flores, N. (2009). *Análisis de valor en la toma de decisiones aplicado a carreteras* [Universitat Politècnica de Catalunya Departament]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=79864>
- Vladovic Zupcevic, M., Pinilla Langeo, M., Roldán Hernández, A., & Martín Forero, L. (2020). Transformación digital aplicada en proyectos de carreteras integración bim-

- gis proyecto de la autovía a-76. *Congreso Nacional de Medio Ambiente*.
<https://bit.ly/3zrdHjd>
- Wu, K. (2015). *Development of PCI-based Pavement Performance Model for Management of Road Infrastructure System* (Issue November) [Arizona State University]. <https://keep.lib.asu.edu/items/154158>
- Wu, Z., & Flintsch, G. W. (2009). Pavement Preservation Optimization Considering Multiple Objectives and Budget Variability. *Journal of Transportation Engineering*, May, 305–316. https://doi.org/10.1061/_ASCETE.1943-5436.0000006
- Zagvozda, M., Dimter, S., Moser, V., & Barisic, I. (2019). Application of GIS technology in Pavement Management Systems. *Gradevinar*, 4, 297–304. <https://doi.org/10.14256/JCE.1980.2017>
- Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Kildienė, S. (2014). State of Art Surveys of Overviews on Mcdm / Madm Methods. *Technological and Economic Development of Economy*, 20(1), 165–179. <https://doi.org/10.3846/20294913.2014.892037>
- Zhiliang, M., & Yuan, R. (2017). Integrated Application of BIM and GIS: An Overview. *Procedia Engineering*, 196(June), 1072–1079. <https://bit.ly/3DG8k23>
- Zorio Blanco, V. (1987). Breve historia de las Carreteras. *Revista de Obras Públicas*, 27 a 38. http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1987/1987_enero_3254_04.pdf

ANEXOS

Anexo A. Antecedentes Históricos de las Carreteras

El crecimiento poblacional de las ciudades de las primeras civilizaciones, la necesidad de transportación de productos agrícolas a centros de comercialización y el descubrimiento de la rueda, hicieron necesario la construcción de los primeros caminos. Estos caminos muy antiguos que según Moreno Gallo (2006), tenían características diferentes entre sí, en función del uso, la necesidad que llevaron a su construcción, los recursos disponibles y la metodología de trabajo aplicada en su momento. El autor expone que los caminos más rudimentarios son sencillas sendas ganaderas de piedra que se han realizado por todo el mundo y por todas las culturas, estos caminos se han encontrado en las montañas de Sudamérica como en las de Europa.

Bañón Blázquez & Bevía García (2000), afirma que los Incas, quienes nunca llegaron a descubrir la rueda, construyeron una red de carreteras que incluye galerías excavadas en roca y atraviesa los Andes; su punto de partida fue el actual Ecuador y su recorrido fue de 3680 km hacia al sur. En la investigación realizada por Jadán et al. (2018), se expone que los caminos aborígenes en lo que hoy es Ecuador, facilitaban el intercambio de productos entre los pueblos de la costa, los andes y la Amazonía, mucho antes de la llegada de los Incas. Estos caminos se caracterizan por su estrechez y por una calzada construida de tierra y guijarros de la zona.

Según Zorio Blanco (1987), la vía más antigua de larga distancia fue la carretera Real Persa que estuvo operativa aproximadamente entre los años 3500 a 300 antes de J. C. Esta vía empezaba en Susa, cerca del golfo Pérsico su trazado avanzaba hacia el noreste a Arbela y de allí hacia el oeste a través de Nínive a Harran, un centro importante de enlace comercial. En los años 700-600 antes de J.C., carreteras antiguas unían palacios y templos en las ciudades de Assur y Babilonia. Estas carreteras estaban construidas de ladrillo cocido y piedra unidos por mortero bituminoso, se consideran precursoras de las calzadas romanas. En su investigación el autor expone que las carreteras imperiales de China coexistieron con la carretera Imperial Persa; las mismas que tenían calzadas amplias, cubiertas con piedra y sus redes viales alcanzaban aproximadamente los 3200

Km y comunicaban las ciudades de Sianfu, Nanking y Cheng-tu. La carretera construida por los egipcios en el Valle del Nilo, tenía una calzada de 18 m de ancho, con un firme artificial, utilizada para el transporte de los grandes bloques de piedra con que se construyeron las pirámides.

Los romanos construyeron caminos eficientes, su técnica constructiva era única para su época, utilizaba materiales como la arena, grava o césped y un sistema de drenaje que permitía la reducción de la humedad y el incremento de la capacidad portante. Expone Zorio Blanco (1987), que durante 2000 años la red de calzadas romanas se conectaron dando lugar a la ruta más larga del mundo, estas vías se caracterizaban por su trazado rectilíneo, con un mínimo número de curvas. Para Bañón Blázquez & Bevía García (2000), esta red vial llegó a tener 80000 km de longitud y su construcción se realizaba para consolidar sus fines militares y políticos.

La Técnica romana fue depurada, un ejemplo es la vía Apia, que según Fienco Jalca et al. (2017), fue construida alrededor del 312 a. C. Colocaban sobre el suelo una capa de piedra plana, sobre la cual extendían detritus de cantera mezclado con cal, que se puede considerar la subbase de las carreteras de la actualidad. Seguidamente colocaban piedra aglomerada con cal y óxido de magnesio, lo que constituye la base. Finalmente un enlosado de piedra sellado con mortero de cal, lo que hoy es la capa de rodadura.

Según Bañón Blázquez & Bevía García (2000), los romanos desarrollaron y perfeccionaron la construcción de carreteras; asimismo adoptaron medidas normativas para la construcción, conservación, reparación y tránsito de los caminos y calzadas, con el fin de mantener en buen estado las vías. Al desaparecer el imperio romano, se abandonó la construcción de nuevas vías y el mantenimiento de las existentes. El autor afirma que en la edad media, la red de carreteras heredada de los romanos se deterioró por falta de mantenimiento. Para rehabilitar estas vías se construyeron las carreteras *Brunehaut*, en el siglo VI en el norte de Francia. A principios del siglo XI, con el desarrollo del comercio internacional, tomó mayor importancia las carreteras; sin embargo debido a la inseguridad viaria disminuyó el tráfico rodado e incrementó el comercio marítimo y fluvial.

En América existe indicios de caminos construidos por los Mayas, Aztecas e Incas; los más notables son los conocidos como caminos blancos “formados con terraplenes de uno y dos metros de elevación, eran cubiertos con una superficie de piedra caliza, cuyos vestigios existen actualmente en Yucatán, México”(Cal y Mayor & Cárdenas Grisales, 1998).

Jadán et al. (2018), expone que antes de la llegada de los Incas, los caminos aborígenes en territorio ecuatoriano fueron senderos estrechos empedrados y eran utilizados por poblaciones locales. Al llegar los Incas estas vías fueron aprovechadas y restauradas con roca labrada, terrazas, muros de piedra sin labrar (pirca), señalización como mojones, entre otras innovaciones propias de las construcciones de esta sociedad; estos caminos fueron conectados estratégicamente con el camino inca o *Qhapag Ñan*.

Como expresa Zorio Blanco (1987), en el siglo XIV el incremento del comercio hace que la gente utilice los caminos con más frecuencia, sin embargo la falta de mantenimiento adecuado para las vías las hace intransitables. Posteriormente durante los siglos XV y XVI tomó relevancia la pavimentación de las carreteras, siendo los franceses los primeros en hacer un estudio planificado y normado de la construcción de caminos.

“El documento técnico más antiguo que se conoce sobre la construcción viaria es una ordenanza policial de Julich-Berg que data de 1554 y regula la reparación de caminos con piedras, madera y haces hallados en la proximidad” (Zorio Blanco, 1987). En el siglo XVIII con la creación de la primera escuela de ingeniería del mundo, surge el primer tratado de construcción de caminos, se vuelven populares los pavimentos, y se exponen los criterios para la estabilización de suelos y conservación de las vías.

Bañón Blázquez & Bevía García (2000), manifiesta que en los Estados Unidos de América, los nuevos caminos se hicieron siguiendo las rutas de los antiguos caminos indios, en 1755 se construyó el *Cumberland road*, que facilitó la actividad militar, no se evidencia interés en el mantenimiento de este camino, hasta que se implementó el peaje en las vías. Las primeras carreteras con peaje se construyeron en Virginia en el año 1785 y se lo hizo con fondos públicos, sin embargo el sector privado fue quien construyó y explotó la mayor red de carreteras antes de la llegada del ferrocarril.

Los autores mencionan, que en el siglo XIX los ingenieros británicos John Loudon McAdam y Thomas Telford, así como el Ingeniero francés Pierre-Marie-Tresaguet, perfeccionaron los métodos y técnicas de construcción de carreteras. Asimismo dan a conocer detalles de estos métodos.

- a) El método de McAdam permitía construir caminos para soportar cargas de tránsito rodados livianos y rápidos, la construcción se hacía utilizando una capa de piedra machacada sin aglomerante colocada directamente sobre el suelo natural, considerando los niveles adecuados para un buen drenaje; el uso continuo pulía la piedra generando superficie deslizantes. El uso de ruedas de caucho en los vehículos a motor causó deterioro en las vías y se hicieron evidente los socavones, baches y exceso de polvo; para dar solución a este problema surgieron nuevos criterios para mejorar la capa asfáltica.
- b) El método de Thomas Telford consideraba prioritario la construcción de cimientos con materiales resistentes como la roca, para que la carretera soporte las máximas cargas transmitidas por los vehículos pesados.
- c) El método de Tresaguet consistía en tres capas: un cimiento de piedras gruesas hincadas a mano, una capa de regulación hecha de fragmentos de piedras apisonada a mano que transmitía las cargas a la base y una capa de rodadura de áridos muy pequeños machacados y colocados con una paleta asegurando el bombeo del 3% en el origen; además en los lados del camino existía bordes de piedra para confinar las piedras pequeñas de la superficie.

Medina (2019), expone que en Ecuador, en 1861 se autorizó la construcción de un proyecto vial que uniera Quito con Guayaquil. Posteriormente entre los años 1883 y 1895 las vías de comunicación son parte importante de un proyecto político para consolidar la autoridad del estado, y garantizar el modelo el desarrollo del agro y de la exportación de sus productos. El gobierno de esta época prefirió las vías férreas y la construcción de caminos de herradura para que la Sierra tenga salida al mar. Uno de los estudios fue para Azogues y Cuenca, mediante el proyecto de ferrocarril que llegara hasta Machala y Puerto Bolívar, así como un pequeño proyecto Zaruma – Puerto Bolívar para transportar el oro de las minas de Zaruma. En 1887 se crea el Cuerpo de Ingenieros, en 1888 se forma una

comisión consultiva, seguidamente la Dirección General y finalmente en 1892 se crea un ministerio de obras públicas.

El propósito de fortalecer la integración y el desarrollo del país, ha llevado a cada gobierno, de este periodo, a la construcción de vías de comunicación, priorizando las líneas férreas sobre las carreteras; del mismo modo crearon los espacios académicos para la formación de técnicos en ingeniería, y organismos de administración pública para gestionar los proyectos viales, en sus etapa de diseño, construcción y mantenimiento. Los recursos económicos, políticos y no menos importantes las condiciones propias del terreno y clima, han limitado la ejecución de importantes proyectos de carreteras.

En el siglo veinte, el crecimiento de los automóviles como medio de transporte hace necesario la construcción de nuevas redes de carreteras con características especiales que permita la circulación de estos vehículos sin interrupciones y que se tome en consideración aspecto medioambiental. En 1907 se construyó en Estados Unidos “una carretera de cuatro carriles con accesos limitados y ningún paso a nivel que interceptase su recorrido; fue el comienzo de la actual red de autopistas existentes en este país”(Bañón Blázquez & Bevía García, 2000).

Además el autor expone que en 1929 los franceses agregan grava al asfalto en caliente y en estado líquido y esto mejoró la capacidad de adherencia de las llantas a la capa de rodadura, dando mayor estabilidad a los vehículos que circulan por estas calzadas. En 1938 la red de autopistas del tercer Reich alcanzaba una extensión de 2000 Km. A partir de 1956, motivados por la declaración de Ginebra de 1950, en Europa se dinamiza la construcción de una red de autopistas, la conservación y mantenimiento de las carreteras existentes; de igual manera se estandariza la señalización y se establece códigos para los grandes ejes viales a los que se les asigna la letra E seguido de un número. Una de las autopistas más importantes de Europa es la *Autostrada del Sole* que une Milán con Nápoles, por la técnica utilizada en la construcción de los viaductos y túneles que ha necesitado esta obra.

En los países latinoamericanos la construcción de vías de ferrocarril era una de las políticas públicas más importante para la vida institucional y el desarrollo económico de

los estados durante los años de transición del siglo XIX al XX. De la misma manera en Ecuador, a inicio del siglo XX, seguía siendo prioridad la construcción de líneas férreas para la transportación en ferrocarril. Caspa Pacheco (2020), en su investigación sobre la política de transportes en Ecuador entre 1925 y 1963, expone que hasta 1925 en Ecuador había menos de 500 Km de carreteras transitables para vehículos livianos; a partir del proyecto político juliano se moderniza la gestión de la infraestructura del transporte y los proyectos viales están sujetos a la política comercial; la creciente demanda de vehículos genera la construcción de nuevas carreteras, por lo que en 1940 el inventario de vías registraba 6221 Km. El autor concluye que para el año 1963 ya se había construido 15624 km de carreteras eficientes para el tránsito vehicular. Asimismo enfatiza que la historia empresarial y la ingeniería ecuatoriana están estrechamente vinculadas en los cambios sustanciales de los proyectos viales del país.

Como expresa Moreno Gallo (2006), en pleno siglo XXI, el diseño y construcción de las vías están condicionadas a factores medioambientales, protección de terrenos agrícolas, edificaciones, terrenos urbanos, yacimientos arqueológicos y políticos, y otros; que desplazan el eje del mejor trazado de la carretera, por muy estratégicos, internacionales o de primer orden que sean las vías. Estas consideraciones se priorizan para mantener un equilibrio entre el cuidado de medio ambiente, la inclusión social y la rentabilidad económica del área de influencia de las carreteras, en la actualidad se ha adoptado el termino sostenible para identificar este tipo de estudio, diseño y construcción de vías.

Para Bañón Blázquez & Bevía García (2000), las carreteras modernas se construyen considerando la naturaleza geológica y geotécnica del suelo donde se va a construir; el tránsito vehicular, las pendientes, la capacidad portante del suelo y de los pavimentos para soportar las cargas de diseño. El trazado geométrico se realiza evitando rutas antiguas y áreas congestionadas; se innova en temas de seguridad vial y en los casos requeridos se estabiliza el suelo con cemento, cal y betún asfáltico, seguidamente se coloca la capa de base pétreo y sobre ella la capa de rodadura que puede ser betún asfáltico u hormigón. El uso de equipos y maquinarias modernas mejoran el rendimiento de la construcción de la vía. El autor enfatiza en el apoyo de la fotogrametría aérea en la elección del mejor trazado. Las innovaciones tecnológicas han aportado metodologías

constructivas de carreteras, más eficientes, mejorando de esta manera los tiempos de ejecución y la disminución de los costos de la obra.

El Estado Ecuatoriano ha expedido nuevas leyes y reglamentos de vías e infraestructura de transporte, y ha publicado manuales técnicos para el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras. Las especificaciones técnicas recogen aportes y recomendaciones de modernas formas constructivas de carreteras de otros países y su aplicación es adaptada a las condiciones: ambientales, geotécnica e hidrológicas del área donde se construirá la carretera.

En Ecuador, a principios de siglo, se ha fortalecido los ejes viales existentes y se ha construido importantes carreteras para el desarrollo económico del país; como ejemplo tenemos la construcción de la carretera del Pacífico, conocida con la Ruta del Sol o ruta del *Spóndylus*; las carreteras que conectan la Amazonía con el resto del país y con motivo del acuerdo de paz, se financió cuatro ejes viales fronterizos que incluye las provincias de Loja, El Oro, Zamora Chinchipe.

En la Provincia de el Oro, en el marco del convenio de paz se construye el eje vial uno, que inicia en la “Y del Cambio, parroquia del cantón Machala y se conecta con la “Y” de Tillales del cantón El Guabo. Este eje vial está diseñado para seis carriles, en la actualidad, está en proceso de construcción. En la planificación de proyectos viales se encuentra el mejoramiento de la Vía Balosa que conecta la ciudad de Machala con la Troncal E25, está diseñada para cuatro carriles y pavimento flexible y la regeneración de la Vía la Ferroviaria de pavimento rígido, actualmente en etapa final de construcción.

El desarrollo de la humanidad avanza y surge nuevos criterios, estrategias y metodologías de construcción, conservación y mantenimiento de las carreteras, con el propósito de minimizar el daño generado por la mala calidad del suelo, el clima, la humedad y su uso frecuente. El uso de las tecnologías en los proyectos viales permite seleccionar el mejor trazado; disminuir costos y tiempos de construcción; definir estrategias idóneas de mantenimiento, tomando en consideración el cuidado del medio ambiente y el fortalecimiento social. En la actualidad los proyectos viales se enmarcan en los convenios internacionales de desarrollo sostenible.

Anexo B. Elementos geométricos de la vía

Vías

Según la Real Academia de la Lengua Española, la vía es un camino, una calzada construida para la circulación rodada. Al referirse a la carretera, afirma que son caminos públicos, anchos y espaciados, pavimentados y dispuestos para el tránsito de vehículos. Se conceptualiza a la vía como el camino o carretera pública, de calzada ancha, pavimentada que permite la circulación de vehículos de manera continua, con niveles adecuados de seguridad y comodidad. Para Cárdenas Grisales (2013), debe ser funcional de acuerdo a sus características geométricas y volumen de tránsito; adaptada al paisaje de modo que facilite al conductor el recorrido; además económica y amigable con el medio ambiente.

Clasificación de vías

Los aspectos técnicos, administrativos, funcionales, el tipo de terreno, la ubicación geográfica, entre otros; son considerados por diferentes autores para establecer una clasificación de las vías. De acuerdo a Cárdenas Grisales (2013) y según el Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (2012), las carreteras se clasifican por:

- a) Función (capacidad TPDA): carreteras primarias o de primer orden, carreteras secundarias o de segundo orden y carreteras terciarias o de tercer orden.
- b) Tipo de Terreno: carreteras en terreno plano, carreteras en terreno ondulado, carreteras en terreno montañoso, carreteras en terreno escarpado
- c) Competencia o Jerarquía en la red vial: carreteras nacionales, carreteras departamentales, carreteras, veredas o caminos vecinales, carreteras distritales y municipales
- d) Característica de calzadas: autopistas, carreteras multicarril, carreteras de dos carriles.

Clasificación por capacidad (función del TPDA)

El Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (2012), hace una clasificación de vías según el volumen de tráfico. En la Tabla, se detalla los tipos de vías por su función, considerando el Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA). De acuerdo a esta clasificación, las vías se diseñan con las características funcionales y geométricas correspondientes a su clase y se pueden construir por etapas en función del incremento del tráfico y del presupuesto.

Clasificación Funcional de las Vías en Base al TPDA

| Descripción | Clasificación Funcional | Tráfico Promedio Diario Anual al año de horizonte | |
|---------------------------------|-------------------------|---|-----------------|
| | | Límite Inferior | Límite Superior |
| Autopista | AP2 | 80000 | 120000 |
| | AP1 | 50000 | 80000 |
| Autovía o Carretera Multicarril | AV2 | 26000 | 50000 |
| | AV1 | 8000 | 26000 |
| Carretera de 2 carriles | C1 | 1000 | 8000 |
| | C2 | 500 | 1000 |
| | C3 | 0 | 500 |

Fuente: Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (2012).

Vías de primer orden.

Según Kraemer et al. (2003), las carreteras principales son aquellas que integran las zonas más importantes de producción y consumo de un país. Permiten un tráfico a larga distancia y siempre deben estar pavimentadas. Las vías de primer orden se conceptualizan como las carreteras de alta capacidad vial que conectan poblaciones de importante producción agrícola y comercial; con características geométricas y de estructura adecuadas para proporcionar una operación eficiente y segura a lo largo de su vida útil.

Capacidad vial.

De acuerdo con Cal y Mayor y Cárdenas Grisales (1998), la capacidad vial es una medida de la eficiencia del servicio que presta una carretera, y se define como la tasa máxima de

flujo vehicular que puede pasar por la vía durante un intervalo de tiempo. Para las vías de primer orden el flujo vehicular es continuo, no se dispone de elementos externos de control que interrumpa la circulación de tránsito vehicular. El Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (2013), menciona que para vías de dos o más calzadas y cuatro o más carriles, la capacidad se da por carril y por hora.

Tránsito

Según el Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (2012), el tránsito es el conjunto de vehículos y usuarios que circulan o circularán por la carretera, indica el nivel de servicio e incide directamente en el diseño geométrico de la vía. Según Hirooka Koshigoe et al. (2019), el tránsito permite establecer las cargas de diseño de las capas que conforman la estructura del pavimento para que resistan, transmitan y distribuyan las solicitaciones, evitando deformaciones excesivas y garantizando un rendimiento adecuado durante su vida útil.

Composición de tráfico

Según Kraemer et al. (2003), la composición del tráfico se define mediante la proporción de vehículos en la intensidad media diaria (IMD), que es el número total de vehículos que han pasado por una sección de la carretera durante un año, dividido por 365; en función de IMD se clasifica a las vías y define su importancia. El tráfico está formado por: motocicletas, vehículos livianos y vehículos pesados.

De acuerdo con Bañón Blázquez & Bevía García (2000), los vehículos pesados poseen mayores dimensiones y circulan a menor velocidad en comparación con los vehículos livianos, este tipo de vehículos incide significativamente en la capacidad de la vía y su nivel de servicio. En el análisis de tráfico se establece el equivalente en vehículos livianos, es decir, se determina el número de vehículos livianos que generan el mismo impacto en el tráfico que un vehículo pesado.

Tráfico promedio diario anual (TPDA)

Es el total de vehículos que pasan durante un periodo dado (en días completos) igual a un año, es decir, el tránsito anual (TA), dividido para el número de días del periodo (365 días). El Tráfico Promedio Diario Anual se lo expresa con la siguiente relación:

$$TPDA = \frac{TA}{365}$$

Geometría de la vía

Según el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (2012), la geometría de la vía es una configuración tridimensional integrada por una proyección horizontal, una proyección vertical y sus secciones transversales. Cárdenas Grisales (2013), manifiesta que el diseño geométrico de la carretera es un proceso de correlación entre sus elementos físicos y las características de operación de los vehículos; su geometría se define por el trazado de su eje en planta y por el trazado de su sección transversal.

En otras palabras, el trazado geométrico de una vía es una combinación articulada de alineamientos horizontales, alineamientos verticales y secciones transversales, que se proyectan o diseñan considerando la capacidad vehicular que debe soportar durante toda su vida útil. A continuación, se detallan los elementos geométricos:

- a) Alineamiento horizontal: “es la proyección sobre un plano horizontal de su eje real o espacial. Dicho eje está constituido por una serie de tramos rectos denominados tangentes, enlazados entre si por curvas”(Cárdenas Grisales, 2013). Esta proyección horizontal de tramos rectos conectados por suaves curvas, representan la ruta o trayectoria del camino o vía.
- b) Alineamiento vertical: el alineamiento de perfil, “es la proyección del eje real o espacial de la vía sobre una superficie vertical paralela al mismo. Debido a este paralelismo, dicha proyección mostrará la longitud real del eje de la vía” (Cárdenas Grisales, 2013). Al mismo tiempo el autor manifiesta que el eje vertical

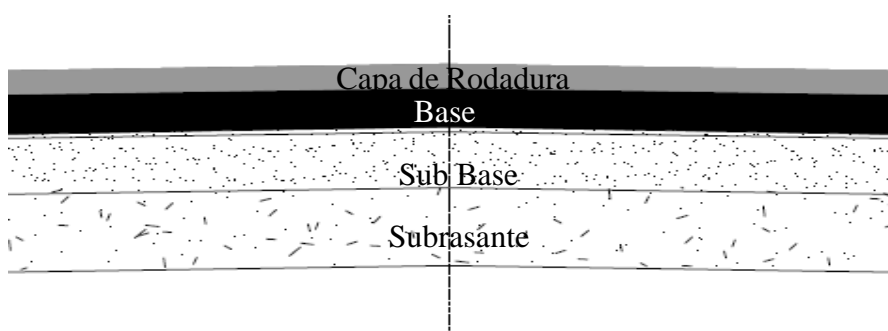
se lo denomina rasante y está constituido por tangentes verticales que se enlazan con curvas sucesivas. Además, la pendiente máxima para las vías de primer orden se establece considerando la velocidad de circulación de los vehículos.

- c) Sección transversal: para Kraemer et al. (2003), la sección transversal de una carretera está integrada por: la calzada, que es la zona por donde circulan los vehículos y está dividida en franjas longitudinales denominadas carriles; el arcén; y la berma. Además, permite identificar las características geométricas relacionadas al ancho de vía y de los elementos que la constituyen; asimismo se muestra los espesores de las capas de la estructura del pavimento.

Pavimento

El Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (2012) describe al pavimento como una combinación de capas de Subbase, Base y de Superficie o Rodadura colocadas sobre el cimiento o subrasante, con el propósito de soportar los esfuerzos transmitidos por el tránsito vehicular y distribuir de manera uniforme los esfuerzos en la plataforma. Además Bañón Blázquez & Bevía García (2000), señala que aparte de las características de resistencia, el pavimento debe aportar propiedades que garanticen la seguridad y comodidad de los usuarios durante el periodo de diseño y bajo cualquier condición climática. En la Figura, se muestra las capas que componen la estructura del firme, las mismas se construye sobre el terreno natural o subrasante y debe garantizar la eficiencia de la vía, durante toda su vida útil.

Estructura Típica de un Pavimento



En palabras de Rondón Quintana & Reyes Lizcano (2016), la estructura del pavimento la integran las siguientes capas:

- a) Capa de Rodadura: en un pavimento flexible está compuesta de una carpeta asfáltica apoyada sobre capas de menor rigidez, su función es disipar las cargas vehiculares y transmitir a través de las capas granulares estos esfuerzos a la subrasante sin generar deformaciones que afecten el deterioro funcional o estructural de pavimento. En el caso de pavimento rígido esta superficie es una losa de hormigón hidráulico como aglomerante, agregados y aditivos
- b) Base: es la capa que está ubicada debajo de la capa superficial o carpeta asfáltica en el caso de pavimento flexible y debajo de la losa de hormigón en pavimentos rígidos; está compuesta de materiales granulares o tratados, colocados sobre otra capa denominada subbase, sin embargo puede ser construida directamente sobre la subrasante. Su función es transmitir las cargas generadas del tránsito a las capas subyacentes. Para pavimentos flexibles el espesor oscila entre 15 y 30 cm y en pavimento rígidos entre 10 y 25 cm.
- c) Subbase: es la capa granular que subyace a la base granular, generalmente se coloca sobre la subrasante, su función es transmitir los esfuerzos, en magnitudes moderadas, que son generados por el tránsito, además contribuye al drenaje y facilita el proceso constructivo. Su espesor para pavimentos rígidos es de 10 y 25 cm y para pavimentos flexibles es de 10 a 50 cm.
- d) Subrasante: es la capa del cimiento que cumple la función de soportar las cargas que son transmitidas por las capas que conforman la estructura del pavimento; generalmente esta capa está formada por el terreno natural, sin embargo puede ser mejorada con la aplicación de materiales que incrementen su capacidad portante.

Tipos de Pavimentos

Los pavimentos pueden ser:

- a) Pavimentos Flexibles: estructura compuesta por capas granulares y una capa de material bituminoso

- b) Pavimentos Semirrígidos: está compuesto por capas asfálticas sobre una base tratada con asfalto o con cemento, se incluyen en esta clase los pavimentos adoquinados.
- c) Pavimentos Rígidos: Está compuesto por una capa de subbase granular, o puede ser estabilizada con cal, asfalto o cemento, no obstante, esta capa puede ser de base granular y una capa de rodadura de losa de concreto.

Pavimentos Flexibles

Según Rondón Quintana & Reyes Lizcano (2016), esta estructura vial está conformada por una capa asfáltica apoyada sobre capas de material granular no tratado o ligados y éstas a la vez colocadas sobre el cimiento, terreno natural o subrasante; el pavimento se diseña para soportar las cargas de los vehículos que circulan por la carretera; estos esfuerzos se disipan a través de cada capa, de manera que al llegar al cimiento no produzca deformaciones funcionales ni estructurales. También esta estructura debe resistir las acciones del medio ambiente a lo largo de su vida útil. Por lo tanto, debe aplicarse acciones de mantenimiento adecuadas que garanticen su eficiencia durante su periodo de diseño.

Anexo C. Objetivos y Políticas planteados por varios autores

| Autores-Año | Objetivos y Políticas |
|---|---|
| Z. Wu & Flintsch, 2009 | Programas de rehabilitación y mantenimiento depende de múltiples objetivos y consideraciones |
| Daryl & Hudson & Haas & Pedigo 1979 | Las decisiones deben ser tomadas a la luz de sus efectos inmediatos y futuros |
| Guaita y Serra, 2016 | Londres ha establecido como objetivo el mantener un nivel de serviciabilidad constante en la red; y como política mantener las superficies de las vías exentas de irregularidades |
| Council of Paris, 2015 | París, incluye objetivos para minimizar los contaminantes emitidos y prioriza las soluciones medioambientalmente aceptables. Incluye entre sus políticas las de reutilización de materiales. |
| Comune di Milano, 2015 | Milán, ha incluido dentro de sus políticas sanciones a las empresas que incurran en retrasos o ejecuciones incorrectas en el mantenimiento de la red vial. Con ello persigue mejorar la eficiencia de las actuaciones |
| Sydney City Council, 2012 | Sidney, considera como principal objetivo de los mantenimientos, el de maximizar el valor de la red vial a largo plazo. Consideran como restricciones las afecciones ambientales y sociales |
| Área de Gobierno de Medio Ambiente y Movilidad, 2013f | Madrid ha optado por implantar dentro de su gestión de pavimentos una plataforma de recogida y gestión de incidencias en la vía pública denominada “MADRID AVISA”. Lo que señala que dentro de sus políticas considera el confort de los usuarios de la red vial. |

Anexo D. Contribuciones de varios investigadores sobre inventario de vías

| Autores, Año | Inventario (base de datos georreferenciada) |
|--|---|
| Picado-Santos, 2004 | Un inventario recoge de manera sistemática y organizada la información de la red vial |
| Para Kraemer et al., 2003 | Consisten en una recopilación ordenada de datos relacionados a los elementos y características de la vía, fiable y actualizado. Las inspecciones visuales y las auscultaciones con sensores permiten evaluar el estado del pavimento y planificar su conservación |
| Macea-Mercado et al., 2016 | Utiliza un dispositivo electrónico adaptado a un vehículo, que permite tomar la información georreferenciada y generar mapas que se pueden presentar en las páginas Web |
| Díaz-Vilariño et al., 2016 | Usa datos LiDAR en el proceso de clasificación automática del deterioro del pavimento. |
| Reyes-Ortiz et al., 2019 | Plantea la implementación de la técnica de inteligencia artificial |
| Pellicer Armiñana et al., 2020 | Expone la utilización de un sistema innovador de bajo costo a partir de redes neuronales convolucionales |
| Manual Vial; Volumen 6 del Ministerio de Transporte y Obras públicas, 2012 | Un inventario vial se confecciona y actualiza, realizando operaciones rutinarias que tienen como finalidad identificar, evaluar y registrar los caminos que conforman la red vial de manera global y de cada uno de sus elementos. |
| Shah et al., 2014 | Los elementos deben ser evaluados estructural y funcionalmente. La información registrada debe ser completa y fidedigna. |
| Zagvozda et al., 2019 | Incluye: jerarquía de vía, geometría, volumen y composición de tráfico, estructura de pavimento, modelos de predicción de la condición del pavimento, tipos de tratamiento en función de los daños, emisiones de CO ₂ , costos tratamiento, así como otros criterios de tipo social. |
| Autodesk, Infracore, 2021 | Información de las cartografías , modelos teóricos del área de estudio |
| Esri, ArcGIS, 2021 | Archivos <i>shapefile</i> del área de estudio |
| Instituto Geográfico Militar, 2020 | Base de datos georreferenciados, de acceso público |

Anexo E. Deterioros de Pavimentos Flexibles, Norma ASTM D 6433

| No. | Tipo de Daño | Unidad | Nivel de Severidad | Característica |
|-----|------------------------------|--------|--------------------|--|
| 1 | Piel de cocodrilo | m2 | Baja | Grietas finas capilares y longitudinales que se desarrollan de forma paralela con unas pocas o ninguna interconectadas. Las grietas no están descascaradas, es decir, no presentan rotura del material a lo largo de los lados de la grieta. |
| | | | Media | Desarrollo posterior de grietas piel de cocodrilo del nivel L, en un patrón o red de grietas que pueden estar ligeramente descascaradas. |
| | | | Alta | Red o patrón de grietas que ha evolucionado de tal forma que las piezas o pedazos están bien definidos y descascarados los bordes. Algunos pedazos pueden moverse bajo el tránsito. |
| 2 | Exudación | m2 | Baja | La exudación ha ocurrido solamente en un grado muy ligero y es detectable únicamente durante unos pocos días del año. El asfalto no se pega a los zapatos o a los vehículos |
| | | | Media | La exudación ha ocurrido hasta un punto en el cual el asfalto se pega a los zapatos y vehículos únicamente durante unas pocas semanas del año. |
| | | | Alta | La exudación ha ocurrido de forma extensa y gran cantidad de asfalto se pega a los zapatos y vehículos al menos durante varias semanas al año. |
| 3 | Agrietamiento en bloque | m2 | Baja | Bloques definidos por grietas de baja severidad, como se define para grietas longitudinales y transversales |
| | | | Media | Bloques definidos por grietas de severidad media |
| | | | Alta | Bloques definidos por grietas de alta severidad. |
| 4 | Abultamientos y Hundimientos | m | Baja | originan una calidad de tránsito de baja severidad |
| | | | Media | originan una calidad de tránsito de severidad media |
| | | | Alta | originan una calidad de tránsito de severidad alta |
| 5 | Corrugación | m2 | Baja | originan una calidad de tránsito de baja severidad |
| | | | Media | originan una calidad de tránsito de severidad media |

| No. | Tipo de Daño | Unidad | Nivel de Severidad | Característica |
|-----|-----------------------------------|----------------|-----------------------|--|
| | | | Alta | originan una calidad de tránsito de severidad alta |
| 6 | Depresión | m ² | Baja Media Alta | 13.0 a 25.0 mm 25.0 a 51.0 mm Más de 51.0 mm |
| 7 | Grieta de Borde | m | Baja Media Alta | Agrietamiento bajo o medio sin fragmentación o desprendimiento Grietas medias con algo de fragmentación y desprendimiento. Considerable fragmentación o desprendimiento a lo largo del borde |
| 8 | Grietas de reflexión de junta. | m | Baja Media Alta | 1. Grieta sin relleno de ancho menor que 10.0 mm, o 2. Grieta rellena de cualquier ancho (con condición satisfactoria del material llenante). 1. Grieta sin relleno con ancho entre 10.0 mm y 76.0 mm. 2. Grieta sin relleno de cualquier ancho hasta 76.0 mm rodeada de un ligero agrietamiento aleatorio. 3. Grieta rellena de cualquier ancho, rodeada de un ligero agrietamiento aleatorio. Cualquier grieta rellena o no, rodeada de un agrietamiento aleatorio de media o alta severidad. 2. Grietas sin relleno de más de 76.0mm. 3. Una grieta de cualquier ancho en la cual unas pocas pulgadas del pavimento alrededor de la misma están severamente fracturadas (la grieta está severamente fracturada). |
| 9 | Desnivel Carril/berma | m | Baja Media Alta | La diferencia en elevación entre el borde del pavimento y la berma está entre 25.0 y 51.0 mm La diferencia está entre 51.0 mm y 102.0 mm La diferencia en elevación es mayor que 102.00 mm |
| 10 | Grieta Longitudinal y Transversal | m | Baja Media | 1. Grieta sin relleno de ancho menor que 10.0 mm 2. Grieta rellena de cualquier ancho (con condición satisfactoria del material llenante). 1. Grieta sin relleno de ancho entre 10.0 mm y 76.0 mm. 2. Grieta sin relleno de cualquier ancho hasta 76.0 mm, rodeada grietas aleatorias pequeñas. 3. Grieta rellena de cualquier ancho, rodeada de grietas aleatorias pequeñas. |

| No. | Tipo de Daño | Unidad | Nivel de Severidad | Característica |
|-----|------------------------|--------|--------------------|--|
| | | | Alta | 1. Cualquier grieta rellena o no, rodeada de grietas aleatorias pequeñas de severidad media o alta. 2. Grieta sin relleno de más de 76.0mm de ancho. 3. Una grieta de cualquier ancho en la cual unas pocas pulgadas del pavimento alrededor de la misma están severamente fracturadas. |
| 11 | Parcheo | m2 | Baja | El parche está en buena condición buena y es satisfactorio. La calidad del tránsito se califica como de baja severidad o mejor. |
| | | | Media | El parche está moderadamente deteriorado o la calidad del tránsito se califica como de severidad media. |
| | | | Alta | El parche está muy deteriorado o la calidad del tránsito se califica como de alta severidad. Requiere pronta sustitución. |
| 12 | Pulimento de agregados | m2 | N/a | No se define ningún nivel de severidad. Sin embargo, el grado de pulimento deberá ser significativo antes de ser incluido en una evaluación de la condición y contabilizado como defecto. |
| 13 | Huecos (Baches) | m2 | Baja | Huecos de diámetro <762mm: Profundidad máxima de hueco 12.7 a 25.4 mm el diámetro medio 102 a 203 y 203 a 457mm. Profundidad máxima de hueco >25.4 a 50.8mm diámetro medio 102 a 203mm |
| | | | Media | 1. Para huecos de diámetro <762mm: Profundidad máxima de hueco 12.7 a 25.4mm, diámetro 457 a 762mm Profundidad máxima de hueco >25.4 a 50.8 mm, diámetro 203 a 457mm Profundidad máxima de hueco >50.8mm, diámetro de 102 a 203mm y 203 a 457mm 2. Para huecos de diámetro >762mm: Se mide el área (pies ² o m ²) y se divide para 5 pies ² o 0.47m ² para hallar en número de huecos equivalentes. La profundidad es menor o igual a 25mm |
| | | | Alta | 1. Para huecos de diámetro <762mm: Profundidad máxima de hueco >25.4 a 50.8 mm, diámetro 457 a 762mm. Profundidad máxima de hueco >50.8mm, diámetro 457 a 762mm 2. Para huecos de diámetro >762mm: Se mide el área (pies ² o m ²) y se divide para 5 pies ² o 0.47m ² para hallar en número de |

| No. | Tipo de Daño | Unidad | Nivel de Severidad | Característica |
|-----|--|--------|-----------------------|---|
| | | | | huecos equivalentes. La profundidad es mayor a 25mm |
| 14 | Cruce de vía férrea | m2 | Baja Media Alta | Produce calidad de tránsito de baja severidad. Produce calidad de tránsito de severidad media. Produce calidad de tránsito de severidad alta. |
| 15 | Ahuellamiento | m2 | Baja Media Alta | Profundidad media del Ahuellamiento: 6.0 a 13.0mm Profundidad media del Ahuellamiento: >13.0 mm a 25.0mm Profundidad media del Ahuellamiento: > 25.0mm |
| 16 | Desplazamiento | m2 | Baja Media Alta | Causa calidad de tránsito de baja severidad Causa calidad de tránsito de severidad media. Causa calidad de tránsito de alta severidad. |
| 17 | Grietas parabólicas (Slippage) | m2 | Baja Media Alta | Ancho promedio de la grieta menor que 10.0mm Existe una de las siguientes condiciones: 1. Ancho promedio de la grieta entre 10.0 mm y 38.0mm. 2. El área alrededor de la grieta está fracturada en pequeños pedazos ajustados. Existe una de las siguientes condiciones: 1. Ancho promedio de la grieta mayor que 38.0mm. 2. El área alrededor de la grieta está fracturada en pedazos fácilmente removibles. |
| 18 | Hinchamiento | m2 | Baja Media Alta | El hinchamiento causa calidad de tránsito de baja severidad. El hinchamiento de baja severidad no es siempre fácil de ver, pero puede ser detectado conduciendo en el límite de velocidad sobre la sección de pavimento. Si existe un hinchamiento se producirá un movimiento hacia arriba. El hinchamiento causa calidad de tránsito de severidad media. El hinchamiento causa calidad de tránsito de alta severidad. |
| 19 | Meteorización/ Desprendimiento de agregados. | m2 | Baja | Han comenzado a perderse los agregados o el ligante. En algunas áreas la superficie ha comenzado a deprimirse. En el caso de derramamiento de aceite, puede verse la mancha del mismo, pero la superficie es dura y no puede penetrarse con una moneda. |

| No. | Tipo de Daño | Unidad | Nivel de Severidad | Característica |
|-----|--------------|--------|--------------------|---|
| | | | Media | Se han perdido los agregados o el ligante. La textura superficial es moderadamente rugosa y ahuecada. En el caso de derramamiento de aceite, la superficie es suave y puede penetrarse con una moneda. |
| | | | Alta | Se han perdido de forma considerable los agregados o el ligante. La textura superficial es muy rugosa y severamente ahuecada. Las áreas ahuecadas tienen diámetros menores que 10.0 mm y profundidades menores que 13.0 mm; áreas ahuecadas mayores se consideran huecos. En el caso de derramamiento de aceite, el ligante asfáltico ha perdido su efecto ligante y el agregado está suelto. |

Nota. Características de niveles de severidad de los deterioros de pavimentos flexibles.

Fuente: Adaptada de Norma ASTM D 6433, *Pavement Condition Index (PCI)*, Vásquez (2002).

Anexo F. Contribuciones de autores sobre el proceso de evaluación del pavimento

| Autores | Evaluación del pavimento/modelos de predicción |
|--|---|
| Hirooka Koshigoe et al. (2019) | Los factores que contribuyen en el deterioro del pavimento son: parámetros de diseño, la calidad de materiales utilizados, los agentes ambientales, el volumen de tráfico y la tasa de crecimiento de los vehículos. |
| Vásquez (2002) | En esta investigación se revisa la metodología del Índice de Condición del Pavimento (PCI), que evalúa objetivamente al pavimento y no requiere de instrumentos especializados |
| ASTM International (2007) | El índice de condición de pavimento se fundamenta en los resultados del inventario visual. Propone los rangos de PCI, su descripción cualitativa y el código de color |
| Valdés Vidal et al. (2012) | las cargas de tránsito tienen mayor incidencia en la determinación o predicción del deterioro del pavimento en un periodo dado |
| Bañón Blázquez & Bevia García (2000) | Los daños superficiales son deformaciones que afectan la geometría de la capa de rodadura de la vía |
| Para Neves y Fragopol (como se citó en Torres Machí, 2015) | Los modelos de comportamiento consideran que la aplicación de tratamiento produce efectos como: aumento puntual de PCI; detiene el deterioro y reduce la velocidad del daño durante un intervalo de tiempo posterior a la aplicación. |

Anexo G. Contribuciones de autores sobre modelos de predicción de deterioro del pavimento

| Autores | Evaluación del pavimento/modelos de predicción |
|--|--|
| Valdés Vidal et al. (2012) | Las cargas de tránsito tienen mayor incidencia en la determinación o predicción del deterioro del pavimento en un periodo dado |
| Bañón Blázquez & Bevía García (2000) | Los daños superficiales son deformaciones que afectan la geometría de la capa de rodadura de la vía |
| Llopis-castell et al. (2020) | Realizar un modelo de predicción del estado del pavimento requiere del análisis de variables que son: la antigüedad del pavimento; los deterioros de cada segmento del pavimento, medido por el PCI; la capacidad estructural, medida por su número estructural (SN); el tráfico, que incluye los factores de tráfico promedio diario anual de vehículos, así como la carga equivalente de eje único (ESAL); y los factores climáticos durante la edad del pavimento |
| Para Neves y Fragopol (como se citó en Torres Machí, 2015) | Los modelos de comportamiento consideran que la aplicación de tratamiento produce efectos como: aumento puntual de PCI; detiene el deterioro y reduce la velocidad del daño durante un intervalo de tiempo posterior a la aplicación. |
| Pellicer Armiñana et al. (2020) | predecir la condición futura del pavimento tiene como finalidad programar de forma eficiente a corto y largo plazo, el presupuesto y las actividades adecuadas para el mantenimiento vial |
| George et al. (1989) | Es de tipo mecánico-empírico, plantea la ecuación basada en la edad del pavimento, el volumen y el peso del tráfico expresados en términos de cargas equivalentes (ESAL) |
| Wu (2015) | relacionando la condición del pavimento flexible con el tiempo |
| Picado Muñoz (2016) | El modelo propone la relación del PCI en el tiempo y se considera además un factor de incertidumbre que puede variar en función de la importancia del camino |

Anexo H. Intervención en Función de los Niveles de Deterioro del Pavimento Flexible.

| No. | Tipo de Daño | Unidad | Nivel de Severidad | Intervención |
|-----|-----------------------------------|--------|--------------------|---|
| 1 | Piel de cocodrilo | m2 | Baja | No se hace nada, sello superficial, sobrecarpeta. |
| | | | Media | Parqueo parcial o en toda la profundidad (full depth), sobre carpeta, reconstrucción. |
| | | | Alta | Parqueo parcial o en toda la profundidad (full depth), sobre carpeta, reconstrucción. |
| 2 | Exudación | m2 | Baja | No se hace nada. |
| | | | Media | Se aplica arena/ agregados y cilindrado. |
| | | | Alta | Se aplica arena/ agregados y cilindrado (precalentando si fuera necesario). |
| 3 | Agrietamiento en bloque | m2 | Baja | Sello de grietas con ancho mayor a 3.0 mm. Riego de sello. |
| | | | Media | Sellado de grietas, reciclado superficial. Escarificado en caliente y sobre carpeta. |
| | | | Alta | Sellado de grietas, reciclado superficial. Escarificado en caliente y sobre carpeta. |
| 4 | Abultamientos y Hundimiento | m | Baja | No se hace nada. |
| | | | Media | Reciclado en frío. Parqueo profundo o parcial. |
| | | | Alta | Reciclado (Fresado) en frío. Parqueo profundo o parcial sobre carpeta. |
| 5 | Corrugación | m2 | Baja | No se hace nada. |
| | | | Media | Reconstrucción. |
| | | | Alta | Reconstrucción. |
| 6 | Depresión | m2 | Baja | No se hace nada. |
| | | | Media | Parqueo superficial, parcial o profundo. |
| | | | Alta | Parqueo superficial, parcial o profundo. |
| 7 | Grieta de Borde | m | Baja | No se hace nada. Sellado de grietas con ancho mayor a 3.0 mm. |
| | | | Media | Sellado de grietas. Parqueo parcial - profundo. |
| | | | Alta | Parqueo parcial - profundo. |
| 8 | Grietas de reflexión de junta. | m | Baja | Sellado para anchos superiores a 3.0 mm. |
| | | | Media | Sellado de grietas. Parqueo de profundidad parcial. |
| | | | Alta | Parqueo de profundidad parcial. Reconstrucción de la junta. |
| 9 | Desnivel Carril/berma | m | Baja | Re nivelación de las bermas para ajustar al nivel del carril. |
| | | | Media | |
| | | | Alta | |
| 10 | Grieta Longitudinal y Transversal | m | Baja | No se hace nada. Sellado de grietas con ancho mayor a 3.0mm. |
| | | | Media | Sellado de grietas. |
| | | | Alta | Sellado de grietas. Parqueo parcial. |
| 11 | Parqueo | m2 | Baja | No se hace nada. |
| | | | Media | No se hace nada. Sustitución del parque. |
| | | | Alta | Sustitución del parque. |

| No. | Tipo de Daño | Unidad | Nivel de Severidad | Intervención |
|-----|--|--------|--------------------|---|
| 12 | Pulimento de agregados | m2 | N/a | No se hace nada. Tratamiento superficial. Sobre carpeta. Fresado y sobre carpeta |
| | | | Baja | No se hace nada. |
| 13 | Huecos | m2 | Media | Parqueo parcial o profundo. |
| | | | Alta | Parqueo profundo. |
| | | | Baja | No se hace nada. |
| 14 | Cruce de vía férrea | m2 | Media | Parqueo superficial o parcial de la aproximación. Reconstrucción del cruce. |
| | | | Alta | Parqueo superficial o parcial de la aproximación. Reconstrucción del cruce. |
| | | | Baja | No se hace nada. Fresado y sobre |
| 15 | Amueblamiento | m2 | Media | Parqueo superficial, parcial o profundo. Fresado y sobre carpeta. |
| | | | Alta | Parqueo superficial, parcial o profundo. Fresado y sobre carpeta. |
| | | | Baja | No se hace nada. Fresado. |
| 16 | Desplazamiento | m2 | Media | Fresado. Parqueo parcial o profundo. |
| | | | Alta | Parqueo superficial, parcial o profundo. Fresado y sobre carpeta. |
| | | | Baja | No se hace nada. |
| 17 | Grietas parabólicas (Slippage) | m2 | Media | Parqueo parcial. |
| | | | Alta | Parques parcial. |
| | | | Baja | No se hace nada. |
| 18 | Hinchamiento | m2 | Media | No se hace nada. Reconstrucción. |
| | | | Alta | Reconstrucción. |
| | | | Baja | No se hace nada. Sello superficial. Tratamiento superficial. |
| 19 | Meteorización/ Desprendimiento de agregados. | m2 | Media | Sello superficial. Tratamiento superficial. Sobre carpeta. / Parqueo parcial. |
| | | | Alta | Tratamiento superficial. Sobre carpeta. Reciclaje. Reconstrucción. / Parqueo parcial. |
| | | | Baja | No se hace nada. Sello superficial. Tratamiento superficial. |

Nota. Tipos de Intervención en función de la Norma ASTM D6433-07. Fuente: Adaptado de Vásquez (2002), ASTM International (2007) y Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (2013).

Anexo I. Tratamientos preventivos y correctivos en pavimento de asfalto

Tratamientos preventivos

Se considera la aplicación de *Slurry* y micropavimentos para niveles de PCI mayores a 80. Estas mezclas están compuestas de agregados, emulsión asfáltica, agua, relleno mineral y otros aditivos; se colocan uniformemente sobre una superficie previamente preparada. Se utilizan para evitar el desgaste del camino; sus costes son menores que la mezcla en caliente, no es necesario fresar, su colocación es fácil y rápida, no suelta polvo y tiene menor impacto ambiental.

- ***Micropavimento***

En la Norma A143 del *International Slurry Surfacing Association* (2010), se registra que el micro pavimento es una mezcla de asfalto emulsionado con polímeros, agregado mineral, agua y aditivos, esparcidos de manera uniforme sobre la superficie previamente preparada; presenta una textura resistente a los deslizamientos durante su vida útil. Además, permite la reactivación de circulación vehicular poco tiempo después de ser colocada una capa de 0.5 pulgadas (12.7 mm); el tiempo estimado es de una hora siempre que se cumpla con las especificaciones recomendadas. Los materiales utilizados son:

- a) asfalto emulsionado que debe ser modificado con un 3% como mínimo de polímeros fresado o fusionado con el asfalto o la solución emulsionante antes del proceso de emulsificación. El ensayo de calidad debe cumplir las normas AASHTO M 208 o ASTM 2397. La gradación para el ensayo de la mezcla para una vía de alto tráfico, relleno de baches o para superficies muy texturadas, es el Tipo III. Esta gradación brinda máxima resistencia ante el deslizamiento y una superficie de menor desgaste
- b) los agregados serán de piedra molida, como: granito, escoria, caliza, sílex u otro de alta calidad; y/o una combinación de estos. El ensayo de calidad cumple las normas AASHTO y ASTM

- c) relleno mineral para mejorar la consistencia, ajustar las propiedades de fractura y curado de la mezcla. Se puede utilizar cemento portland, hidróxido de calcio, polvo de caliza, ceniza volante u otros rellenos que cumplan la norma ASTM D242
- d) el uso del agua debe estar libre de sales contaminantes
- e) los aditivos para acelerar o retardar la fractura/fraguado del micro pavimento.

El control de calidad de la micro pavimentación, se puede realizar tomando muestras directamente de la máquina. Los datos obtenidos de los dispositivos de medición de la máquina de micro pavimentación pueden utilizarse para determinar las cantidades y la proporción de aplicación de los materiales individuales. Los ensayos sobre el contenido del asfalto residual (ASTM D2172) pueden realizarse en las muestras a cargo del comprador. La unidad de medición es el metro cuadrado y el pago del micro pavimento se realiza por unidad de área o por peso del agregado y del asfalto emulsionado.

- *Lechada asfáltica o slurry seal*

Es una mezcla de agregado fino bien graduado, filler mineral en el caso de ser necesario, asfalto emulsionado y agua. Es aplicado como un tratamiento superficial. Puede ser utilizada en sellado de fisuras y grietas, requiere de una preparación previa de la superficie.

International Slurry Surfacing Association (2010b), manifiesta que en el proceso de emulsificación, el asfalto caliente se corta mecánicamente en partículas muy pequeñas (5-10micrones) se estabiliza y se dispersa por toda la fase acuosa. Además, mantiene las partículas de asfalto separadas entre sí y suspendidas en el agua, lo que permite la utilización del asfalto a temperatura ambiente. El tipo II, es una gradación de agregados que se utiliza para rellenar huecos en la superficie, tratar los daños más severos, a menudo se usa en fallas causadas por la intemperie y desmoronamiento. Además, mejora la resistencia al deslizamiento, prolonga la vida útil y mejora el rendimiento de los pavimentos.

- *Chip Seal o sello de viruta*

Es un tratamiento superficial bituminoso o capa de sellado. Los aglutinantes pueden ser asfaltos emulsionados, cementos asfálticos o versiones de cada uno modificados con polímeros. Los agregados varían de tamaño desde ½ pulgada hasta ¼ de pulgada con menos del 5% de pasante del tamiz N.4; el agregado puede ser piedra triturada, grava, escoria y agregados livianos o manufacturados. Se utiliza el *chip seal* para restaurar la resistencia al deslizamiento y sellar superficies de la carretera, cuando existen daños por humedad u oxidación.

Anexo J. Contribuciones de autores sobre estrategias de mantenimiento de pavimento

| Autores | Estrategias de Intervención en el Mantenimiento de las Vías |
|---|---|
| Tavakoli (1992), Sotil Chávez (2014). | Acciones de mantenimiento en función del PCI |
| Norma A143 del <i>International Slurry Surfacing Association</i> (2010) | Micro pavimento es una mezcla de asfalto emulsionado con polímeros, agregado mineral, agua y aditivos, esparcidos de manera uniforme sobre la superficie previamente preparada; presenta una textura resistente a los deslizamientos durante su vida útil. |
| Torres Machí (2015) | Slurry seal, utilizada en sellado de fisuras y grietas, requiere de una preparación previa de la superficie, |
| Espinoza Valarezo (2018) y Hadjidemetriou et al. (2020) | Es necesario aplicar un fresado previo para recortar y eliminar el espesor del pavimento, dejando una superficie texturizada que sirve de base para el recrecido garantizando el nivel que la calzada tenía antes del tratamiento |
| Torres Machi (2015) Wei y Tighe (2004) y Giustozzi et al. (2012) | Actuaciones de Mantenimiento de Pavimento Flexible. La aplicación de los tratamientos se realiza alternando el tipo de material, la efectividad de los tratamientos se reduce a un 50%, cuando estos se aplican de manera repetitiva; quienes limitan el número de tres aplicaciones del mismo tratamiento. |

Anexo K. Contribuciones de investigadores sobre modelos de toma de decisiones

| Autores | Toma de decisiones |
|----------------------------------|--|
| Tavakoli (1992) | los valores de los factores: tráfico, clase funcional, de ruta, de mantenimiento aplicado |
| Saaty (1997) | Analytic Hierarchy Process AHP |
| Torres-Machi et. al (2015) | algoritmo de optimización heurística que integra criterios económicos, técnicos y ambientales |
| Pellicer Armiñana et al. (2020), | Realiza un análisis de optimización multiobjetivo con algoritmos heurísticos, considerando criterios de intensidad de tráfico, costes e impactos ambientales del mantenimiento, así como la cercanía a puntos de interés. |
| Al-Mansoori et al. (2020) | Utiliza el <i>GIS</i> para seleccionar la alternativa más eficiente en términos de costos mínimos para el mantenimiento y rehabilitación de la vía. |
| Espinoza Valarezo (2018) | Plantean criterios técnicos, económicos ambientales y sociales valorados de manera cuantitativa combinada con el método SAW que permite establecer anualmente un ranking de priorización de las vías, que deben recibir mantenimiento. |
| Villegas Flores (2009) | Utiliza un árbol de decisión donde analiza criterios como el coste de mantenimiento, emisiones CO ₂ , materiales reciclados, consumo de energía, agua, materia prima utilizada, entre otros. |

Anexo L. Guía de entrevista no estructurada

1. Datos generales

- Nombre completo
- Nombre de la Institución:
- Cargo actual

2. Sobre el plan de Mantenimiento en las vías regentadas por la institución

¿Los planes de mantenimiento se realizan de acuerdo a lo planificado y con los recursos previstos?

¿Los planes actuales de mantenimiento de las vías se han formulado con la aplicación de nuevas tecnologías?

¿Qué herramienta tecnológica se ha utilizado en el desarrollo del plan de mantenimiento en las vías que administra esta entidad?

¿La información de los proyectos viales de su institución está almacenada en una base de datos de entornos virtuales?

¿La información de las intervenciones de los planes de mantenimiento se registra en una base de datos?

3. Criterios generales sobre planes de mantenimiento y aplicación de tecnologías

¿Cuál es la etapa del proyecto de una vía en la que considera debe formularse un plan de mantenimiento para que sea eficiente?

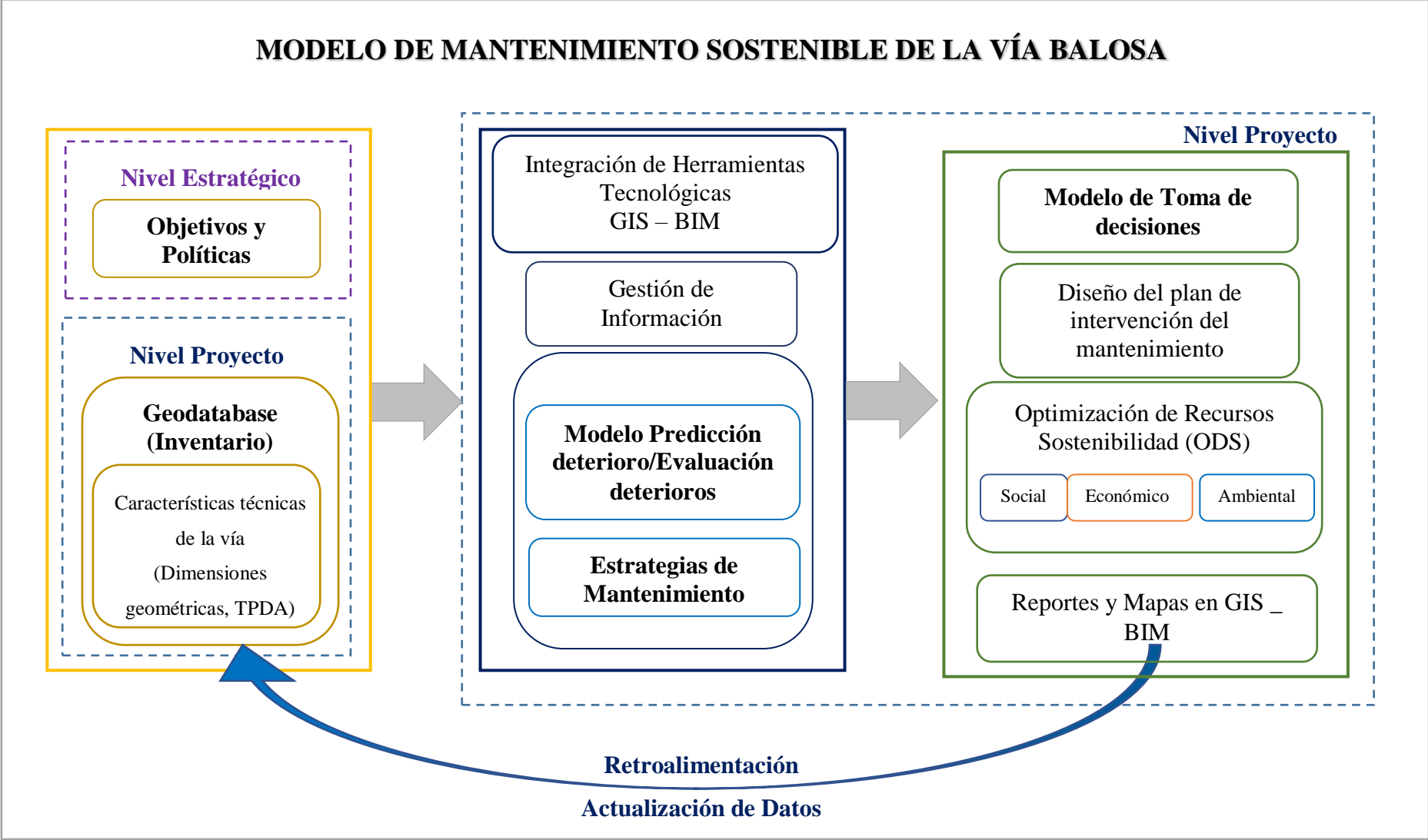
¿Cuál es su criterio sobre la digitalización de la información de los proyectos viales en todas sus etapas?

¿Considera que el uso de las tecnologías en la gestión del mantenimiento de las vías potenciará la calidad operativa de la vía y optimizará recursos de mantenimiento?

¿Cuál es su criterio sobre la aplicación de Sistemas de Información Geográfica en el Mantenimiento de las vías?

¿Cuál es su criterio sobre la aplicación de *Building Information Modeling* en el Mantenimiento de las vías?

Anexo M. Modelo de mantenimiento sostenible de la vía Balosa



Anexo N. Formulario de Registro de Condición del Pavimento

Condición de Pavimento Via Balosa

Formulario para levantamiento de información de la condición del pavimento

1. Nombre del Inspector

2. Coordenadas X (Longitud)

3. Coordenadas Y (Latitud)

4. Que nivel de severidad tiene la falla

Selecciona todos los que corresponden:

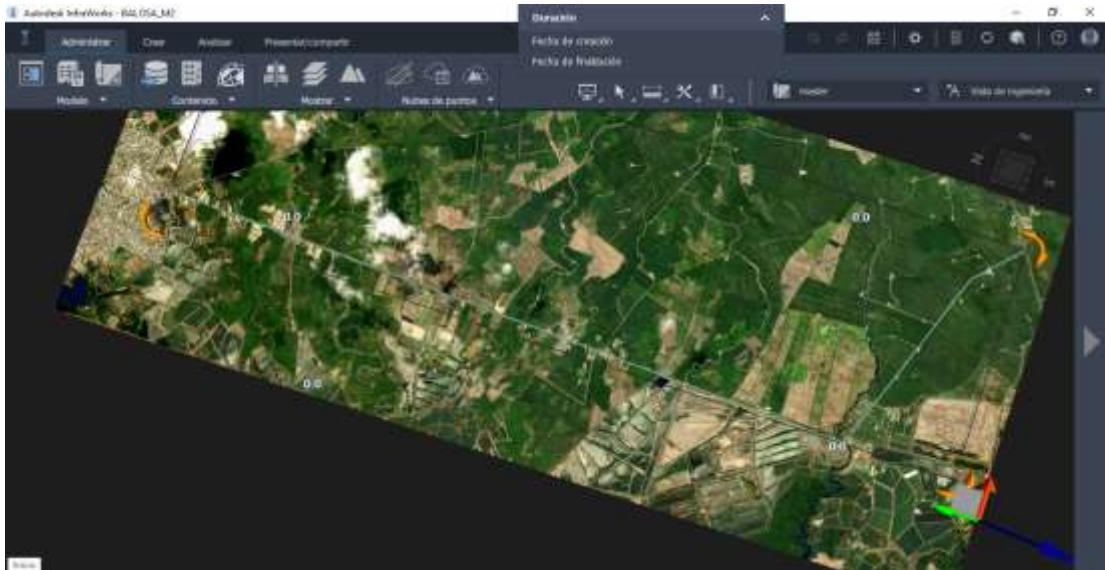
| | alta | media | baja |
|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Pie de Cochambre (m2) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Estructura (m2) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Agregamiento en bloque (m2) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Abultamiento y hundimiento (m) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Corrugación (m2) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Depresión (m2) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Grieta de Borde (m) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Grietas de reflexión de junta (m) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Desnivel Carril/borde (m) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Grieta Longitudinal y Transversal (m) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Parches (m2) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Pulimento de agregados (m2) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Huecos (m2) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Cruce de via Areas (m2) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Anchamiento (m2) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Desplazamiento (m2) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Grietas parabólicas (m2) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Hinchamiento (m2) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Meteorización/ Desprendimiento de agregados (m2) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

5. Cantidad

Nota. Formulario de Google. Fuente: Elaboración propia

Anexo O. Modelo Conceptual en Infracore

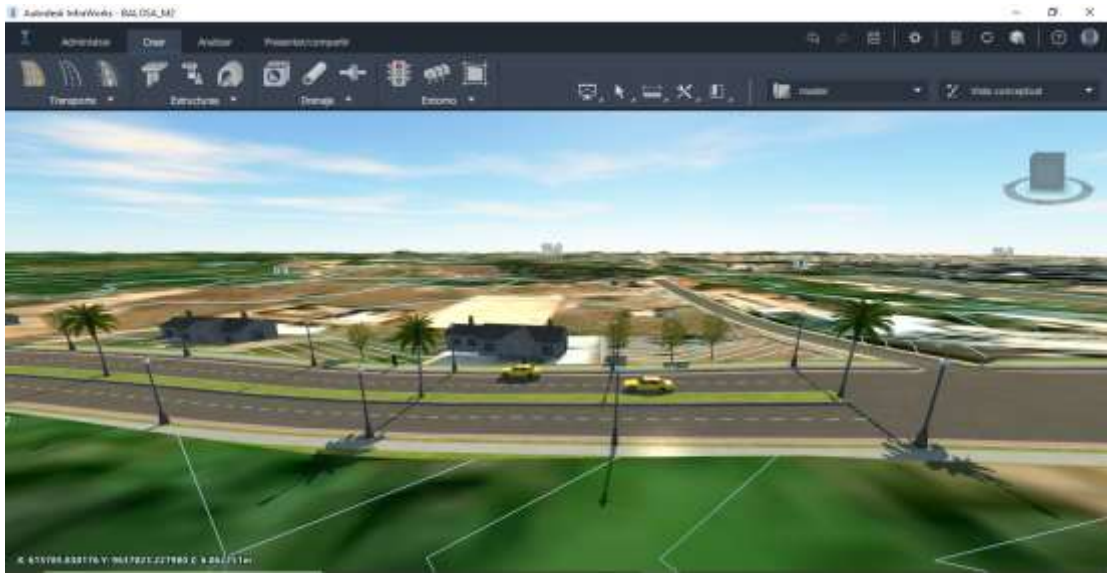
Área de estudio, ubicación vía Balosa, trazado de la vía



Área del puente sobre el río Motuche



Tramo de vía cuatro carriles, intersección con poblado



Tramo de vía cuatro carriles

