

**CAPÍTULO I**  
**DISEÑO TEÓRICO**

# **CAPÍTULO I**

## **DISEÑO TEÓRICO**

### **1.1. Introducción**

La carretera que une a las comunidades de Erquis y Tomatitas, actualmente, comienza a mostrar signos de deterioro en la superficie, por ello, un estudio de las condiciones del pavimento resulta ser vital ya que proporcionará información valiosa para analizar el estado del pavimento, dicho parámetro es necesario para planificar y programar de manera anticipada las acciones que se deberán tomar en cuanto al mantenimiento vial, de manera que esta pueda extender su vida útil más allá del periodo para la que fue diseñada.

Particularmente en el tramo de estudio, desde su puesta en servicio el año 2015, nunca se realizó una auscultación del pavimento por parte de la institución correspondiente; esto manifiesta que no se tiene conocimiento del comportamiento y evolución del deterioro en la vía, dado que, únicamente se interviene cuando los daños en la capa de rodadura son severos y en gran cantidad, esto se ve reflejado en la molestia expresada por los usuarios.

La finalidad que tiene el autor de la investigación, es analizar el estado actual de la plataforma del tramo Tomatitas–Erquis Norte mediante las metodologías PCI, IRI y Viga Benkelman, para posteriormente otorgar un diagnóstico que establezca las acciones de mantenimiento y/o rehabilitación necesaria en el trayecto mencionado, dichas acciones serán planificadas y programadas para un determinado periodo de análisis donde se busca que la carretera otorgue un servicio óptimo al usuario.

Son distintas las áreas de la Ingeniería Civil que intervienen o aportan al desarrollo del proyecto académicamente hablando, no obstante, es importante resaltar la contribución que hacen las ramas afines a la evaluación y mantenimiento de pavimentos flexibles.

No se puede decir que la investigación realizada es una aplicación total de la Ingeniería Civil, dado que, también engloba otra ciencia como es la Estadística que contribuye significativamente al desarrollo de la investigación.

El no tener una correcta planificación del mantenimiento de una carretera, genera la pérdida de la infraestructura y economía de un país, por ello, los resultados que se obtengan en el presente trabajo serán de gran relevancia social.

## **1.2. Antecedentes**

Si bien no se tiene registro de trabajos similares que se hayan desarrollado exactamente en el circuito vial Erquis por parte de alguna entidad o persona competente, si se puede citar y describir algunos proyectos relacionados a la temática aplicada que fueron ejecutados por estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil.

En 2019, Paucari desarrolló su trabajo final “Aplicación del HDM-4 para el análisis de pavimentos de concreto urbanos de la ciudad de Yacuiba”, donde se puede apreciar aspectos que serán claves para desarrollar el presente trabajo, como ser: el comportamiento de los pavimentos a lo largo de su vida útil, alternativas de reparación y mantenimiento preventivo, el uso del software HDM-4 para hallar la mejor alternativa de mantenimiento de la vía analizada y la planificación de las actuaciones por año.

En 2023, Flores en su proyecto denominado “Análisis de alternativas de rehabilitación en vías de bajo tráfico en pavimento flexible y rígido tramo: Chaguaya–El Mollar, ingreso al hotel los Parrales”, contempla aspectos importantes como la evaluación del estado de los pavimentos y la propuesta de alternativas de rehabilitación en los tramos estudiados, el trabajo citado servirá como antecedente ya que, el presente trabajo se desarrollará de manera similar.

Una vez culminado el trabajo servirá como antecedente y apoyo no solo para entidades que necesiten información relacionada a la materia sino también a estudiantes de la carrera que podrán realizar trabajos similares o inclusive podrán ampliar la temática desarrollada.

## **1.3. Justificación del proyecto**

### **1.3.1. Justificación académica**

La vida útil de una carretera está sujeta al tipo y frecuencia de los trabajos de mantenimiento, en nuestro medio, si hablamos de las carreteras que conforman la Red Vial Municipal, se puede apreciar deficiencias en su funcionalidad, por ello se pretende desarrollar el presente trabajo abordando temáticas correspondientes a la Ingeniería Civil como la evaluación y el mantenimiento de pavimentos.

### **1.3.2. Justificación sobre la aplicación técnica–práctica**

En el presente proyecto se plantea la aplicación de metodologías donde se pueda generar resultados concretos para que puedan ser analizados o replicados fácilmente por otros ingenieros a los que les interese esta área de la Ingeniería Civil. Los procesos a desarrollar como la evaluación y planificación del mantenimiento de pavimentos son factibles y aplicables a nuestro medio, por ello será una respuesta o solución para mejorar la situación actual no solo en la vía de análisis sino también las carreteras en general de nuestro país.

### **1.3.3. Justificación e importancia social**

Una vía con un correcto y oportuno mantenimiento brindará una excelente serviciabilidad y seguridad a la población de la ciudad de Tarija, siendo los beneficiarios directos los vecinos de los barrios y comunidades de Erquis, ya que, es una zona donde los principales ingresos de las familias se perciben gracias al turismo y el cultivo de diferentes productos agrícolas los cuales para ser comercializados deben transportarse por esta vía.

## **1.4. Planteamiento del problema**

### **1.4.1. Situación problemática**

Lo que se pretende con el proyecto, es obtener información del estado de la carretera, dicha información nos servirá como punto de partida para proyectar a futuro la evolución del deterioro, de manera que permita programar con anticipación los trabajos que se deberán realizar en la vía y esta pueda extender su vida útil y brindar un servicio óptimo.

El problema surge a raíz de que en nuestro medio no se lleva a cabo una planificación adecuada de los trabajos de mantenimiento de una o una red de carreteras, ni se toma en cuenta el plan de vida de la vía, es decir, no se evalúa el comportamiento de la estructura con el paso del tiempo y solo se interviene cuando el deterioro es muy grave.

Una vía en mal estado, a la hora de ponerla en condiciones óptimas o por lo menos aceptables, genera cuantiosos gastos en caso de que no se tomen acciones oportunas para controlar los defectos expuestos, así mismo se verá comprometida la seguridad y el confort del usuario a la hora de circular por el trayecto.

Para dar solución a la problemática explicada, se pretende inicialmente evaluar la vía para poder analizar y proyectar los resultados que nos permitan conocer el comportamiento de

la estructura en el tiempo y así saber cuál será el momento óptimo para ejecutar los trabajos de mantenimiento y/o rehabilitación necesarios.

## 1.4.2. Delimitación del proyecto

### 1.4.2.1. Delimitación espacial

Se adoptó un área temática general dentro del mantenimiento de carreteras; y como temáticas específicas, la evaluación del deterioro y los efectos que tiene una correcta planificación del mantenimiento de la vía.

Para el desarrollo físico del proyecto, se ha seleccionado un tramo del circuito vial Erquis, el mismo está ubicado en la provincia Méndez municipio de San Lorenzo y conecta las comunidades de Tomatitas, Erquis Oropeza, Erquis Ceibal, Erquis Sur y Erquis Norte; con una longitud de 10 kilómetros.

### 1.4.2.2. Delimitación temporal

**Tabla 1.1. Línea de tiempo del proyecto desarrollado**

<b>Fecha</b>	<b>Evento</b>	<b>Descripción</b>
20, 21 de agosto del 2023	Exploración del tramo	Se realizan actividades preparatorias como mediciones, marcar progresivas, ver de manera preliminar el estado de la vía, etc.
24, 25, 26 y 27 de agosto de 2023	Evaluación del PCI	Recolección de datos de la condición superficial del tramo de análisis.
6 y 15 de septiembre de 2023	Evaluación del IRI	Se registran los datos de la rugosidad con la rueda de Merlín.
6 de septiembre de 2023	Evaluación estructural	Con ayuda de la Viga Benkelman y los auxiliares del laboratorio de asfaltos, se miden las deflexiones que tiene el pavimento.
Septiembre 2023-abril 2024	Preparación del documento	Se procesan los datos registrados en campo y se ordenan los capítulos del trabajo final
Abril de 2024	Entrega del proyecto	Previa revisión del docente, el mismo hace recepción los anillados o borradores del trabajo.
10 de abril 2024	Defensa interna	Se realiza la defensa del trabajo presentado a los tribunales asignados.
A partir de agosto	Presentación final de observaciones	Se debe presentar el documento corregido a los tribunales con todas las observaciones hechas en la predefensa.
A partir de septiembre	Defensa pública	Con el visto bueno por parte de los tribunales se procede con la defensa final.

**Fuente:** Elaboración propia.

Por el tipo de metodologías aplicadas y el comportamiento de una estructura vial; los datos y resultados solo servirán para este tramo en específico.

### **1.4.3. Formulación del problema**

¿De qué manera, se puede establecer que el mantenimiento y rehabilitación de la carretera a Erquis mejore su funcionalidad?

### **1.5. Objetivos**

Los objetivos general y específicos son los siguientes:

#### **1.5.1. Objetivo general**

Analizar el estado actual del pavimento en el tramo Tomatitas–Erquis Norte mediante las metodologías PCI, IRI y Viga Benkelman, para posteriormente otorgar un diagnóstico que establezca las acciones de mantenimiento y/o rehabilitación necesaria en el trayecto mencionado.

#### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Describir los conceptos y principios de los pavimentos flexibles en carreteras según normas vigentes en nuestro país.
- Aplicar la metodología PCI, para caracterizar las patologías halladas en el tramo Tomatitas–Erquis Norte.
- Realizar el levantamiento de datos con la rueda Merlín.
- Determinar la capacidad de soporte que posee el pavimento mediante el método deflectométrico empleando la Viga Benkelman.
- Analizar los resultados y planificar los trabajos de mantenimiento y/o necesarios aplicando el software HDM-4.

### **1.6. Hipótesis**

“El tramo Tomatitas–Erquis Norte no requiere de mantenimiento y rehabilitación por tener Categoría bueno”.

## 1.7. Identificación de las variables

El trabajo de investigación es de carácter aplicativo, a un nivel de investigación descriptiva por lo tanto solo tiene “variable única”.

### 1.7.1. Conceptualización de la variable

La variable propuesta es: el estado actual del pavimento en el tramo de estudio.

### 1.7.2. Operacionalización de la variable

**Tabla 1.2. Operacionalización de la variable**

Variable	Definición	Dimensión	Indicador	Acción
Estado actual de la vía	Saber en qué condiciones se encuentra la vía definirá que tipo de intervenciones serán necesarias para brindar un correcto mantenimiento	PCI	Es un índice que varía desde cero [0], para un pavimento fallado, hasta cien [100] para un pavimento en perfecto estado	Planificación del mantenimiento de la vía
		IRI	[m/km]	
		Viga Benkelman	[0,01 mm]	

**Fuente:** Elaboración propia.

## 1.8. Alcance y tipo de la investigación

La variable que se propone en el subtítulo anterior no es manipulable por el autor definiéndola con un Diseño no experimental y como se indicó anteriormente, por tener variable única es del tipo Descriptivo; y el levantamiento de la información para la investigación será una sola vez por lo tanto su orientación es transeccional o transversal.

El presente trabajo tiene como objetivo principal analizar el estado actual del pavimento en el circuito vial del cantón Erquis, específicamente entre las comunidades de Tomatitas y Erquis Norte ubicadas en la provincia Méndez del departamento de Tarija con una longitud de 10 kilómetros; y con la información recopilada proponer la planificación y programación de los trabajos de mantenimiento necesarios en el tramo.

**CAPÍTULO II**  
**ESTADO DE CONOCIMIENTO**

## **CAPÍTULO II**

### **ESTADO DE CONOCIMIENTO**

#### **2.1. Marco conceptual**

##### **2.1.1. Importancia del mantenimiento y rehabilitación de las carreteras**

En términos amplios, el mantenimiento vial se puede definir como el conjunto de actividades que se realizan para mantener en buen estado las condiciones físicas de los diferentes elementos que constituyen los caminos y, de esta manera, garantizar que el transporte sea cómodo, seguro y económico. Su correcta ejecución implica el establecimiento de niveles adecuados de intervención, dentro del período de duración de cada elemento, con el fin de limitar los efectos del deterioro producido por los procesos naturales y el uso, contribuyendo así a prolongar la vida útil de la obra.

El propósito del mantenimiento es, entonces, conservar la red vial dentro de un nivel compatible con el servicio que deba prestar. Conservar adecuadamente las carreteras tiene tres propósitos principales, todos ellos ligados con el buen funcionamiento de la economía nacional y con la generación de toda una gama de beneficios económicos y sociales: (1) prolongar su vida y diferir la fecha en que se deben renovar; (2) proporcionar comodidad y seguridad, y disminuir los costos de operación vehicular; y (3) garantizar la transitabilidad de manera permanente, con el fin de permitir mayor regularidad, puntualidad y seguridad en los servicios de transporte por carretera. El primer propósito está relacionado directamente con los intereses de la organización administradora de las carreteras, el segundo lo está con los intereses de los operadores de los vehículos y el tercero con la ciudadanía en general (INVIAS, 2016).

Los resultados de estudios realizados en muchas partes del mundo han demostrado que los beneficios más importantes del mantenimiento de carreteras no son los que perciben las autoridades de vialidad, sino los que se obtienen en forma de ahorros en el costo de operación vehicular y en el mejoramiento de la calidad de vida de la comunidad, y que el mantenimiento ofrece el mejor retorno de toda la inversión que se realiza en el sector transporte.

## 2.1.2. Curva de deterioro del pavimento

Aunque los detalles del ciclo presentan diferencias entre los caminos con pavimento asfáltico y los de hormigón o sin pavimento alguno, el mensaje básico es el mismo, y consiste en que en ninguno de los casos debe permitirse el deterioro excesivo o la destrucción de su estructura básica (ABC, Manual de diseño de conservación vial, 2011).

### 2.1.2.1. Etapas o fases del ciclo de un pavimento

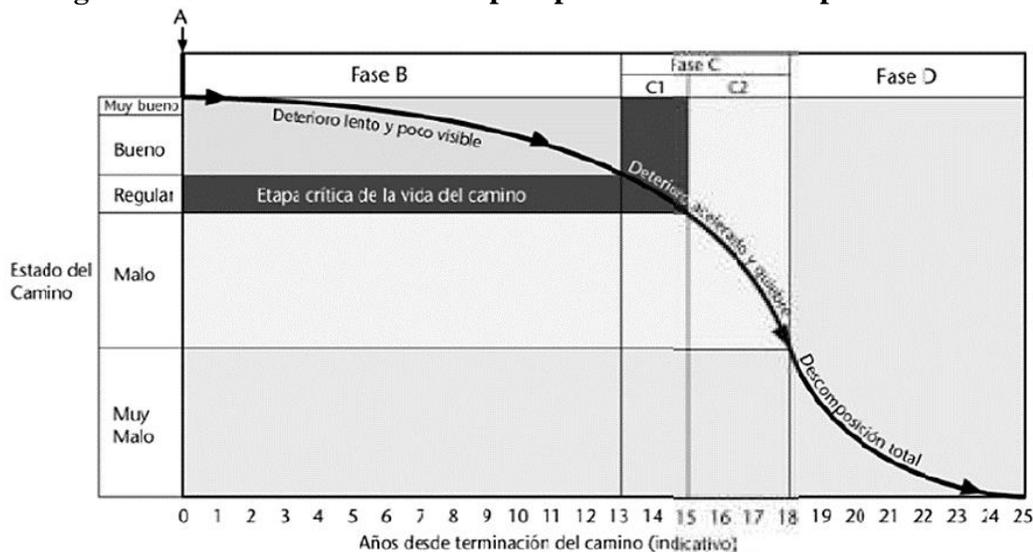
Los caminos, en líneas generales, independientemente del tipo de superficie de rodadura, están sometidos a un ciclo que consta de las siguientes cuatro fases o etapas:

- Fase A. Construcción
- Fase B. Deterioro lento y poco visible
- Fase C. Deterioro acelerado y quiebre
- Fase D. Pérdida total

#### 2.1.2.1.1. Fase A. Construcción

Se refiere a la fase de inversión inicial y el resultado inicial puede ser muy variado, desde una carretera muy bien construida, o con solo algunos defectos, o bien, mal diseñada o con una ejecución deficiente. De todos modos, el camino entra en servicio apenas terminada la obra (Punto A del gráfico).

**Figura 2.1. Curva de deterioro típica para una carretera pavimentada**



**Fuente:** ABC. (2011). Manual de diseño de conservación vial. Bolivia.

#### **2.1.2.1.2. Fase B. Deterioro lento y poco visible**

Durante un cierto número de años, el camino va experimentando un desgaste y un proceso de debilitamiento lento en la superficie pavimentada, asimismo, aunque en un menor grado, en el resto de su estructura. Este desgaste se produce por los vehículos pesados y livianos que circulan por él, también por influencia del clima, del agua de lluvias o las aguas superficiales, la radiación solar, los cambios de temperatura, etc. Para frenar este proceso de desgaste y debilitamiento, es necesario aplicar, con cierta frecuencia, diferentes medidas de mantenimiento, principalmente en el pavimento y en las obras de drenaje. Además, hay que efectuar las operaciones rutinarias de mantenimiento. Si no se ejecutan estas actividades, se acorta el período de desgaste lento y poco visible; en vez de durar 10 o 15 años, el período dura sólo seis u ocho. Durante toda la fase B el camino se mantiene aparentemente en buen estado y el usuario no percibe el desgaste. A pesar del aumento gradual de fallas menores aisladas, el camino sigue sirviendo bien a los usuarios y está en condiciones de ser conservado, en el pleno sentido del término. (Sector B del gráfico).

#### **2.1.2.1.3. Fase C. Deterioro acelerado y quiebre**

Existe un momento oportuno para tomar decisiones para realizar el mantenimiento de las vías y esta es al inicio de la Fase C, el costo de esta intervención representa el 10% del costo de construcción de la carretera.

Después de varios años de uso, el camino entra en una etapa de deterioro acelerado y resiste cada vez menos el tránsito. (Sector C del gráfico). Al inicio de esta fase, la estructura básica del camino aún sigue intacta, las fallas en la superficie son menores, y el usuario común tiene la impresión de que el camino aún se mantiene bastante sólido; sin embargo, no es así. (Sector C1 del gráfico). Más adelante en la fase C, se pueden observar cada vez más daños en la superficie y comienza a deteriorarse la estructura básica.

Estos daños comienzan siendo puntuales, y luego se van extendiendo hasta que finalmente afectan la mayor parte del camino. (Sector C2 del gráfico). La fase C es relativamente corta, ya que comprende un período de entre dos y cinco años. Al inicio de la fase C (Sector C1 del gráfico), normalmente basta con reforzar la superficie del camino, lo que supone un costo relativamente bajo. Si avanzamos dentro de la fase C (sector C2 del gráfico), y dejamos pasar el momento óptimo de intervención, el simple refuerzo de la

superficie ya no es suficiente. Primero deben repararse los daños que se han producido en la estructura básica del camino, posteriormente se coloca el refuerzo.

Al no intervenir en momento alguno durante la fase C, el camino llega al punto de quiebre, es decir, se produce una falla generalizada, tanto del pavimento como de la estructura básica (ABC, Manual de diseño de conservación vial, 2011).

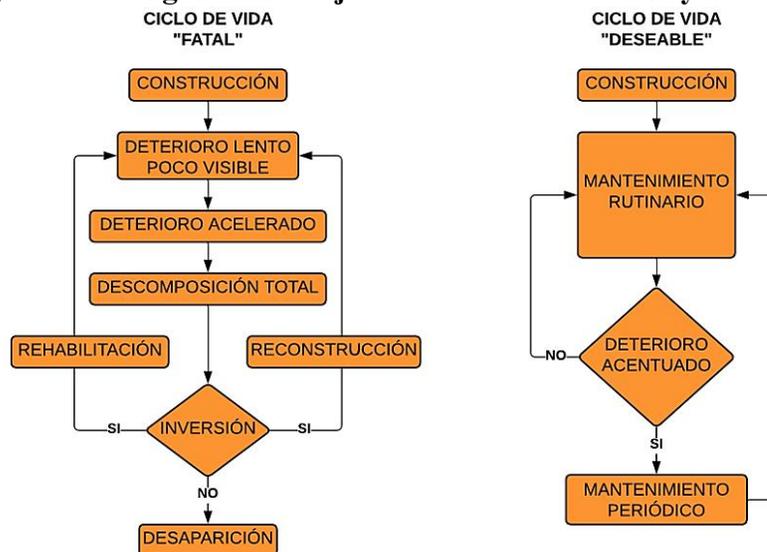
#### 2.1.2.1.4. Fase D. Pérdida total

La pérdida total del camino constituye la última etapa de su existencia y puede durar varios años. Durante ese período, lo primero que se observa es la pérdida de pavimento, hasta que al final termina siendo un camino de grava y a la larga, de tierra (Sector D en el gráfico). El paso de los vehículos se dificulta, la velocidad promedio de circulación baja bruscamente y la capacidad del camino queda reducida a sólo una fracción de la original.

#### 2.1.3. Ciclo de vida de una carretera con y sin mantenimiento

El proceso de ciclo de vida sin mantenimiento se le puede denominar “fatal”, porque conduce al deterioro total del camino, pero con la aplicación de un mantenimiento adecuado se puede llegar a mantener el camino dentro de un rango de deterioro aceptable. El siguiente diagrama de flujo muestra el proceso que sigue un camino sin mantenimiento y otro con mantenimiento, en el que podemos apreciar que la falta de mantenimiento permanente conduce inevitablemente al deterioro total del camino.

**Figura 2.2. Diagrama de flujo del ciclo de vida “fatal y deseable”**



**Fuente:** Mejorado del Manual técnico OIT (2003).

El objetivo del mantenimiento es posibilitar que una vía, resista el desgaste causado por el tráfico, clima y las condiciones del entorno de la zona en que se ubican; prevenir que se generen situaciones de deterioro críticas y asegurar una circulación continua, segura, eficiente, confiable y que cause el menor daño al medio ambiente.

Existe un momento preciso para efectuar ciertos trabajos de mantenimiento de un camino, cuando se postergan estos trabajos, tanto el refuerzo como en el mantenimiento rutinario, la pérdida es muy grande, pues el tipo de intervención necesaria será de rehabilitación, que tiene un costo mucho más alto que el correspondiente a trabajos rutinarios.

#### **2.1.4. El mantenimiento y el patrimonio vial**

En la práctica, lo que se busca con el mantenimiento es preservar en las mejores condiciones el capital invertido en las carreteras y evitar su deterioro físico prematuro. Esto no solo hace referencia a las condiciones materiales, sino que se debe tener en cuenta que la funcionalidad de las carreteras es la parte más importante del patrimonio que representan. Es decir, lo que verdaderamente hace que una carretera sea valiosa es el servicio que presta, más que el cómputo de unos materiales más o menos costosos utilizados en la conformación de estructuras que se presumen adecuadamente diseñadas. En épocas en las que existen problemas de financiación y de tesorería, conocer el estado de los activos de una carretera resulta fundamental para disponer la estrategia de inversión más eficiente posible. Los activos principales de una carretera son sus trazados, sus pavimentos, sus obras de arte, sus equipamientos y sus singularidades. El conocimiento cualitativo y cuantitativo de estos activos permite establecer planes de inversión eficientes, optimizando los recursos materiales y económicos. A finales de los años ochenta, el Banco Mundial publicó un estudio en el que resaltaba que, por falta de mantenimiento adecuado, el estado de la mayoría de los caminos de los países en desarrollo era regular o deficiente, con una tendencia que apuntaba hacia el deterioro acelerado llegando, inclusive, al fin de su vida de diseño mucho antes de lo previsto, y que los trabajos necesarios de reconstrucción costarían el triple de lo que hubiera costado la toma de medidas preventivas oportunas, a lo que habría que sumar los incrementos en los costos de operación vehicular.

##### **2.1.4.1. Clasificación de las operaciones de mantenimiento y rehabilitación vial**

Con el fin de ordenar y organizar los trabajos de mantenimiento, es necesario definir tareas

destinadas a resolver o prevenir los problemas de deterioro de la infraestructura de carreteras. Cada una de ellas tiene un carácter específico y es fácilmente individualizable; se la considera como una unidad básica y se llama operación de mantenimiento. El mantenimiento adecuado y oportuno de una carretera exige, en consecuencia, la ejecución de un conjunto de operaciones durante su periodo de servicio. Existen varias maneras de ordenar y facilitar la programación y la periodicidad de su ejecución. Desde este punto de vista, las operaciones de mantenimiento se dividen en rutinarias, periódicas y de urgencia.

#### **2.1.4.1.1. El mantenimiento rutinario**

comprende actividades que se deben realizar una o más veces por año en una sección de carretera. Tiene como objetivo principal la preservación de todos los elementos de ella con la mínima cantidad de alteraciones o de daños, de manera que la infraestructura vial conserve técnicamente las mejores condiciones de funcionamiento.

Este grupo comprende, entre otras, las operaciones de control de vegetación en el derecho de vía; despedrado manual de taludes; relleno de pequeñas erosiones en taludes; limpieza de calzada, bermas y separadores; limpieza de obras de drenaje, limpieza, reparación e instalación de barandas de puentes, señales y dispositivos de defensa; remoción de pequeños derrumbes, etc. En las carreteras pavimentadas incluye operaciones de perfilado y nivelación de bermas en material granular; parcheo; bacheo y sello de fisuras, y en las no pavimentadas comprende principalmente el bacheo y el mantenimiento del perfil transversal de la calzada.

**Figura 2.3. Trabajos de mantenimiento rutinario**



**Fuente:** Elaboración propia.

#### **2.1.4.1.2. El mantenimiento periódico**

corresponde a intervenciones mediante las cuales se efectúan cambios parciales o ajustes que son necesarios realizar de manera cíclica, a diferentes intervalos, superiores a un año, con el fin de conservar la integridad estructural de los elementos de la carretera o prevenir daños mayores derivados del desgaste producido por los efectos ambientales y el tránsito automotor. Incluye operaciones mayores que requieren equipo y personal especializados, entre ellas la reconstrucción de cunetas y bajantes de agua; el control de erosión de taludes; reparaciones localizadas de puentes; riegos de sello, tratamientos superficiales, lechadas asfálticas, fresado y sobrecapas asfálticas delgadas que no incrementen significativamente la capacidad estructural de los pavimentos asfálticos. Las operaciones de mantenimiento periódico son más costosas que las de mantenimiento rutinario y exigen actividades específicas de identificación y programación para su ejecución. Algunas de ellas requieren, inclusive, diseños de ingeniería. Mediante las operaciones de mantenimiento periódico no se busca directamente mejorar la condición estructural de los elementos viales, sino retardar su deterioro.

**Figura 2.4. Trabajos de mantenimiento periódico**



**Fuente:** El Deber. (2020, octubre). Inspección de la ABC al avance de los trabajos de mantenimiento de la carretera Sta. Cruz-Trinidad.

#### **2.1.4.1.3. El mantenimiento de urgencia**

Llamado también atención de emergencias, comprende toda acción no prevista ni ponderable, debida a fuerzas de la naturaleza o acciones humanas impredecibles que obstaculicen la vía impidiendo el libre tránsito, tal el caso del colapso de estructuras para

el paso de agua, los derrumbes y otras acciones que produzcan de manera súbita el cierre parcial o total de una carretera. Las actividades relacionadas con la atención de emergencias en las carreteras comprenden la remoción, transporte y disposición de los materiales provenientes de derrumbes, caída de rocas y de árboles y productos de avalanchas de ríos o quebradas que se encuentren parcial o totalmente sobre la banca de la carretera, así como la instalación o construcción de estructuras de paso provisional y la limpieza de los encoles, descoles y lechos de agua afectados por el evento.

Su intención no es remediar las fallas estructurales, sino restablecer el flujo del tránsito en el menor tiempo posible, por lo que normalmente deben ir seguidas de intervenciones de rehabilitación o reconstrucción.

**Figura 2.5. Mantenimiento de emergencia**



**Fuente:** Elaboración propia.

#### **2.1.4.1.4. La rehabilitación**

Es la actividad necesaria para devolver a la estructura de pavimento las condiciones de soporte de carga con las que inicialmente se construyó, así como su nivel de servicio en términos de seguridad y comodidad.

Son obras que se ejecutan como consecuencia de la existencia de problemas en la condición superficial, funcional, estructural y/o de seguridad en sectores de la infraestructura vial, con el objeto de darles solución, previa demolición parcial o total de las estructuras existentes. La rehabilitación es una intervención indeseada, pues en la mayoría de los casos surge como una necesidad por no haber existido un adecuado mantenimiento rutinario, o una respuesta inoportuna a los efectos de un desastre natural.

comprende la reparación selectiva, los reciclados y la colocación de sobrecapas en pavimentos o recargas de grava en afirmados con fines de incrementar la solidez estructural y la calidad de la calzada.

**Figura 2.6. Trabajos de rehabilitación vial**



**Fuente:** Gobernación de Huila. (2019, septiembre). Inicio rehabilitación vial de Cucará-Villavieja.

Un pavimento puede presentar dos tipos de rehabilitación, superficial y estructural.

#### **2.1.4.1.4.1. Rehabilitación superficial**

Se orienta a la colocación, sobre la superficie existente de una carpeta delgada de mezcla asfáltica en caliente o en frío. Esta es la solución más simple a un problema, debido a que el tiempo requerido para completar los trabajos es corto y existe un impacto mínimo sobre los usuarios. El fresado y conformación de material granular, es muy utilizado en los casos en los que se requiere aumentar la capacidad portante del pavimento, así como otras alternativas.

#### **2.1.4.1.4.2. Rehabilitación estructural**

Puede orientarse a una reconstrucción total. Esta es la opción elegida cuando se combina la rehabilitación con una decisión de mejoramiento que demanda un cambio significativo de la carretera. También son considerados la construcción de capas adicionales sobre la superficie existente.

Existen diferentes opciones disponibles para la rehabilitación de un pavimento, pero resulta más complejo determinar cuál de ellas es mejor. Sin embargo, los puntos más importantes para tomar una decisión son la viabilidad de las diferentes opciones de

rehabilitación, el ordenamiento del tráfico vehicular, las condiciones climáticas y la disponibilidad de recursos.

#### **2.1.4.2. Planificación del mantenimiento y rehabilitación vial**

El ciclo de vida de las carreteras depende mucho de sí se ha aplicado una correcta planificación del mantenimiento, ya que sólo de esta forma se logrará reducir los costos asociados a su explotación. Es por ello que resulta necesario establecer un Plan de Mantenimiento Vial considerando diferentes escalas de deterioro. En primer lugar, resulta indispensable un mantenimiento menor con actividades realizadas en periodos cortos (interdiaria o semanalmente), seguidamente se debe realizar mantenimientos periódicos que pueden ser efectuados anualmente y, por último, mantenimientos mayores que se programen en lapsos más grandes a un año. Cada una de estas actividades es fundamental, puesto que, sin el mantenimiento menor, la carretera puede verse deteriorada muy rápidamente y, por otro lado, si solo se desarrollan mantenimientos menores sin considerar los mantenimientos periódicos, entonces serán más frecuentes los mantenimientos mayores.

Para planificar el mantenimiento de una carretera se debe estimar:

- El momento de la intervención
- El tipo de intervención

##### **2.1.4.2.1. Cuando intervenir**

Cada actividad del mantenimiento debe ejecutarse habitualmente dentro de un lapso preciso de tiempo. El punto de partida para determinarlo es el conocimiento cabal de los caminos de la red vial, así como también de los efectos del tránsito en los caminos. Este conocimiento permite estimar los momentos oportunos para los diferentes tipos de intervención. La opción de tiempo significa la posibilidad de adelantar acciones de mantenimiento. Una vez detectados los momentos óptimos, puede decidirse sobre la conveniencia de anticipar ciertas intervenciones.

##### **2.1.4.2.2. Tipo de intervención**

Esta opción consiste en definir la dimensión técnica de la intervención. Pueden proponerse varias alternativas para satisfacer las necesidades inmediatas (reforzar la superficie, evitar

la destrucción de la estructura básica del camino, etc.). La diferencia que existe entre las distintas opciones radica en el costo de la intervención, el tiempo que se necesita para ejecutarla y su durabilidad.

La regla general es que las intervenciones óptimas suelen ser aquéllas que tienen una orientación a mediano o largo plazo. Los motivos que se tengan para elegir una u otra opción de dimensionamiento, pueden ser de carácter operacional o financiero.

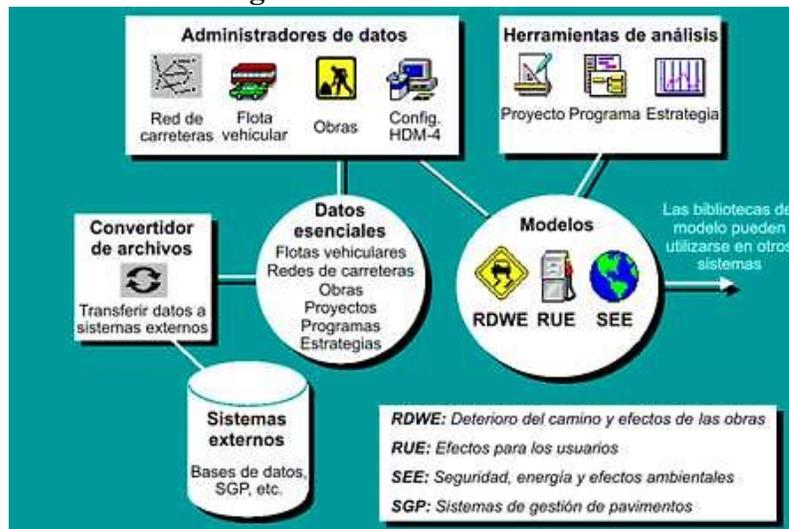
#### **2.1.4.3. Herramientas de apoyo a la planeación del mantenimiento vial**

La administración adecuada del mantenimiento de una vía sólo se puede lograr eficientemente con el apoyo de herramientas muy potentes que ayuden en la planeación, en la toma de decisiones y en la programación adecuada de las labores inherentes al mantenimiento. En ese orden de ideas, utiliza antecedentes como las propiedades de los suelos que componen la infraestructura, las características de las estructuras de pavimento, las condiciones del drenaje y las propiedades y condiciones de los elementos adicionales como taludes, puentes, viaductos, muros de contención, tránsito y de los elementos relacionados con la seguridad vial. Su aplicación eficiente requiere, además, minimizar las inversiones y brindar el máximo beneficio social con los menores impactos ambientales adversos.

Agencias y organizaciones de diferentes países del mundo han desarrollado herramientas de apoyo que pueden ser utilizadas en la planificación del mantenimiento vial. En nuestro país se emplea el modelo de simulación conocido por su sigla HDM-4 (Highway Development and Management - Versión 4), diseñado por el Banco Mundial.

El modelo HDM-4 es una herramienta de cómputo que permite desarrollar evaluaciones sobre la factibilidad técnica y la rentabilidad económica de distintas alternativas de actuación en redes viales o en tramos específicos de ellas. No es una herramienta de optimización, por cuanto no ofrece la solución óptima absoluta del problema que se le plantea, sino que realiza los cálculos correspondientes a cada alternativa que le presente el usuario y suministra los respectivos indicadores económicos y de desempeño para que éste ordene las alternativas y, posteriormente, seleccione aquella que considere óptima de acuerdo con su objetivo.

**Figura 2.7. Modelo HDM-4**



**Fuente:** INVIAS. (2016). Manual de mantenimiento de carreteras. Colombia.

El software HDM-4 servirá como la principal herramienta para el análisis de la planificación del mantenimiento vial. El programa evalúa una serie de efectos, de los cuales para esta aplicación solo se analizaron los siguientes:

- Deterioro de la carretera: Predice el deterioro del firme
- Efectos de las actuaciones: Implementa programas de actuaciones y sus costes.

**Tabla 2.1. Labores de mantenimiento y rehabilitación HDM-4**

Mantenimiento rutinario	Mantenimiento periódico	Especial
En pavimento: parcheo, sellado de grietas, reparación bermas, etc.	Tratamientos preventivos: sellos, riegos, sellado de juntas, cepillado, etc.	Emergencias, mantenimiento invernal.
Drenaje	Renovación superficial: tratamientos superficiales, lechadas, etc.	
Miscelánea: control de vegetación, señalización, etc.	Rehabilitación: sobrecapas, etc.	

**Fuente:** Elaboración propia.

### 2.1.5. Necesidades de mantenimiento y rehabilitación

Las actividades normales de mantenimiento de una carretera abarcan desde tareas muy simples hasta operaciones muy complejas y, a los efectos de este proyecto se dividen en

rutinarias, periódicas, de emergencia y de rehabilitación, dependiendo de las características del trabajo y de la periodicidad con que se requiere realizarlo. Todos los elementos de la carretera requieren inspección y mantenimiento para conservar su buen estado: el derecho de vía, la explanación, las obras de drenaje, los muros, las calzadas pavimentadas y no pavimentadas, los elementos de señalización y seguridad vial, las obras de paso y los túneles.

#### **2.1.5.1. Mantenimiento del derecho de vía**

El derecho de vía o ancho de zona es la faja de terreno destinada a la construcción, mantenimiento, futuras ampliaciones si la demanda de tránsito así lo exige, servicios de seguridad, servicios auxiliares y desarrollo paisajístico de una carretera. Dentro de esta faja de terreno quedan comprendidas la corona de la carretera, los elementos de drenaje lineal, los taludes de corte y terraplén y los dispositivos de señalización y seguridad, así como áreas auxiliares destinadas a la adaptación de accesos a propiedades aledañas a la carretera, intersecciones con otras carreteras, paraderos, zonas de descanso, entre otras.

Las actividades que involucra el mantenimiento rutinario del derecho de vía son variadas: rocería y limpieza, poda de arbustos y árboles, retiro de basuras y otros elementos extraños, siembra de césped, jardinería, remoción de señales ilegales y de otros elementos invasores, reparación y reemplazo del cercado del derecho de vía, entre otras.

**Figura 2.8. Control de vegetación en derecho de vía**



**Fuente:** INVIAS. (2016). Manual de mantenimiento de carreteras. Colombia.

### 2.1.5.2. Mantenimiento de los elementos de señalización y seguridad vial

Toda señalización tiene una vida útil en función de los materiales utilizados en su fabricación, de la acción del medio ambiente, de agentes externos y de la permanencia de las condiciones que la justifican. Por ello, es imprescindible que las autoridades responsables de la instalación y mantenimiento de las señales levanten un inventario de ellas y cuenten con un programa de mantenimiento e inspección que asegure su oportuna limpieza, reemplazo o retiro.

La señalización limpia, legible, visible, en buen estado y pertinente inspira respeto en los conductores y peatones. A su vez, cualquier señal que permanece en la vía sin que se justifique, o se encuentra deteriorada, dañada o rayada, solo contribuye a su descrédito y al de la entidad responsable de su mantenimiento, y constituye además un estímulo para actos vandálicos. En los programas de mantenimiento se deberán programar mediciones periódicas de los niveles de retroreflectividad de la señal tal como se encuentra en la vía y mediciones luego de hacer limpieza al tablero, con el objeto de hallar los niveles de retroreflectividad percibidos por el usuario y determinar si la señal requiere limpieza o reemplazo por estar debajo de los niveles mínimos establecidos.

La finalidad del mantenimiento de la señalización vial “es conservar las señales, las demarcaciones y demás dispositivos, de manera que permitan a los usuarios de la vía su fácil identificación, lectura e interpretación. El mantenimiento de la señalización debe propender por que el proyecto de señalización continúe siendo funcional y consistente con la geometría de la vía, al tiempo que contribuya con una circulación cómoda y segura”.

**Figura 2.9. Mantenimiento de señalización vertical**



**Fuente:** INVIAS. (2016). Manual de mantenimiento de carreteras. Colombia.

Teniendo en cuenta la vulnerabilidad de los elementos de señalización a algunos agentes adicionales al medio ambiente, como vandalismo, accidentes, derrumbes, etc., las actividades requeridas para sus mantenimientos rutinario y periódico son muy variadas.

### **2.1.5.3. Mantenimiento de calzadas pavimentadas**

El manual chileno de mantenimiento vial expresa, en relación con las calzadas pavimentadas, lo siguiente: “En consideración a las elevadas inversiones involucradas, a los limitados períodos de vida útil que se alcanzan y a las crecientes interferencias con el tránsito que producen las reposiciones complementarias de los pavimentos, en los últimos años y en casi todo el mundo se le ha dado una creciente importancia a establecer nuevos y mejores métodos de mantenimiento de los pavimentos. En la actualidad se cuenta con una serie de nuevas herramientas que, al permitir prever y cuantificar los daños e intervenir con el procedimiento más adecuado en el momento más oportuno, logran prolongar significativamente la vida útil de un pavimento”.

Estas nuevas herramientas incluyen no solamente procedimientos para determinar de manera más objetiva las capacidades estructural y funcional de los pavimentos sino, además, elementos de programación que permiten prever la aparición de deterioros con suficiente anticipación para actuar sobre los pavimentos de manera preventiva sin tener que esperar que el estado de los pavimentos alcance un nivel de deficiencia que obligue a la rehabilitación o a la reconstrucción como únicas alternativas. Estos métodos, junto con otros de tipo administrativo, son los que han revolucionado el concepto del mantenimiento vial, generando los sistemas de administración de pavimentos.

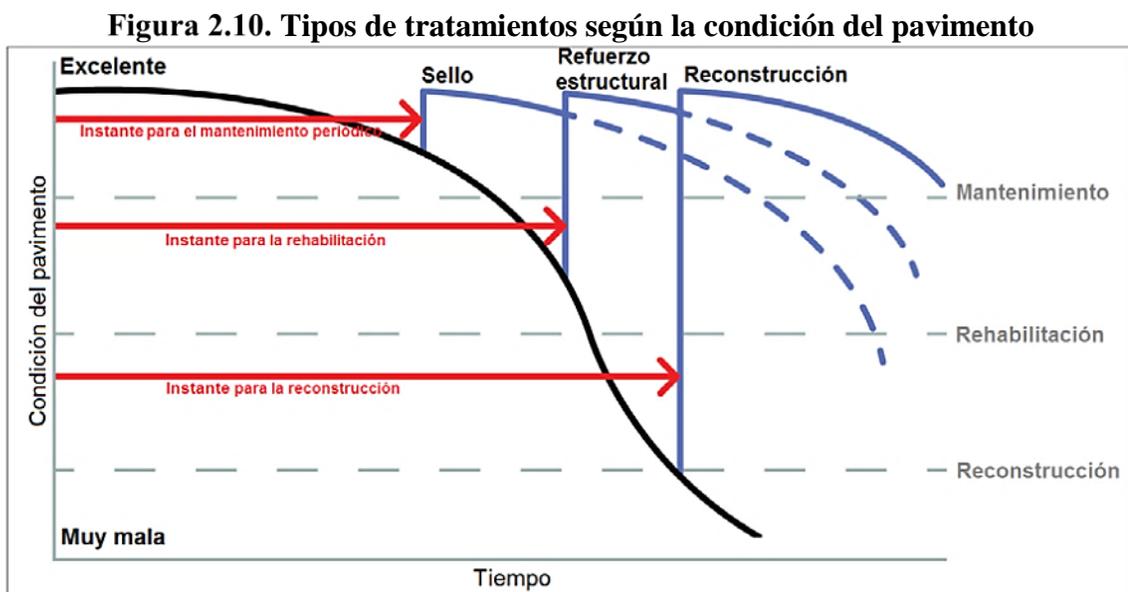
Dada su preponderancia dentro de la globalidad del mantenimiento vial, el análisis de las necesidades de mantenimiento de las vías pavimentadas será el punto que se tratará con más detalle en el presente trabajo.

### **2.1.6. Relación entre la condición de las calzadas pavimentadas y las necesidades de mantenimiento y/o rehabilitación**

“Por definición, el mantenimiento sólo debe incluir trabajos que, en términos generales, estén orientados a preservar el camino para que preste un servicio adecuado por el tiempo previsto en el diseño y bajo las condiciones de tránsito y ambiente prevalecientes. De acuerdo con ello, un camino bien diseñado y perfectamente construido sobre un terreno

ideal de características homogéneas, no debería requerir más mantenimiento que el que corresponde a operaciones de rutina y periódicas. Sin embargo, claramente la situación es otra; a veces, al poco tiempo de la puesta en servicio comienzan a detectarse pequeñas fallas que, de no repararse oportunamente, llevan al colapso prematuro de sectores crecientes de la obra”

La siguiente imagen ilustra los lapsos posibles para acometer diferentes categorías de tratamientos de acuerdo con la condición del pavimento, con el fin de restaurar su condición de servicio inicial.



**Fuente:** INVIAS. (2016). Manual de mantenimiento de carreteras. Colombia.

Desde el punto de vista técnico, las opciones de intervención en una calzada en cualquier instante de su vida se deben escoger tanto en función de su condición funcional y estructural en el momento de realizar la evaluación técnica, como de su tipo (pavimento asfáltico, pavimento rígido, adoquines, afirmado).

La necesidad del mantenimiento rutinario de una calzada pavimentada o en afirmado es tan obvia que no requiere ni diseño ni justificación alguna; en cambio, la recomendación de acciones específicas de mantenimiento periódico y principalmente de rehabilitación debe estar precedida de un estudio de condición y de un juicio de ingeniería en relación con las capacidades funcional y estructural del tramo de carretera objeto de la evaluación.

Los trabajos de mantenimiento periódico están enfocados a solucionar una necesidad de tipo funcional como, por ejemplo, reparar desperfectos prematuros, reducir la tasa de degradación de la capa de rodadura, mejorar el aspecto de la calzada o las condiciones de adherencia neumático-pavimento, restaurar el sello de las juntas en pavimentos rígidos, impermeabilizar la superficie del pavimento o proporcionar una diferencia visual entre la calzada y las bermas en aras de la seguridad. Casi siempre, una actividad de mantenimiento periódico cumple simultáneamente varias de estas funciones, así se aplique por una razón específica. Para que el efecto del trabajo de mantenimiento periódico sea efectivo, es condición necesaria que, en el instante de su ejecución, la condición estructural del pavimento aún sea satisfactoria.

### **2.1.7. Generalidades sobre los estudios de condición**

El estudio de la condición de un pavimento o de un afirmado consiste en la recolección y el análisis de datos relacionados con sus características funcionales y estructurales. En el pasado, los encargados de las carreteras se apoyaban en su experiencia y en inspecciones visuales para programar las operaciones de mantenimiento. El problema de esta técnica radica en el hecho de que la experiencia es difícil de transmitir de una persona a otra y, por lo tanto, las decisiones que se tomaban a partir de la misma información solían variar considerablemente. En cambio, los estudios de condición suministran un método razonable y consistente para obtener y analizar objetivamente la información con el fin de asignar eficientemente unos recursos que, generalmente, son limitados. Mediante los estudios de condición, una agencia encargada de la administración de carreteras puede:

- Evaluar periódicamente los comportamientos estructural y funcional de la red vial a su cargo o de tramos de ella
- Establecer la manera cómo evolucionan los deterioros de los pavimentos y de los afirmados
- Determinar y programar las necesidades de mantenimiento
- Definir la necesidad de acometer una evaluación estructural detallada para el diseño de obras de rehabilitación
- Proyectar trabajos de mejoramiento

- Disponer de información para determinar los efectos de las restricciones presupuestales y de la dilación del mantenimiento
- Seguir el comportamiento de diferentes diseños y materiales empleados en la construcción de los pavimentos
- Disponer de información para alimentar los sistemas de administración de pavimentos

Existen muchos métodos para definir la condición de un segmento de carretera en un momento determinado. Muchos de los sistemas de administración de pavimentos emplean un método particular para recolectar los datos y para definir los estados de condición o de capacidad funcional y estructural de los pavimentos.

La literatura técnica disponible sobre los estudios de condición es copiosa, un estudio de condición comienza con la recolección de información. Posteriormente, los datos obtenidos se deben interpretar para definir el grado de comportamiento del pavimento en el momento del estudio. Generalmente, se emplean los siguientes tipos de inspecciones y medidas en el caso de las calzadas pavimentadas:

- Deterioros superficiales
- Capacidad estructural

#### **2.1.7.1. Características funcionales de los pavimentos flexibles**

La condición superficial de los pavimentos es un factor de la mayor importancia, tanto para las entidades encargadas de la administración vial, por su incidencia sobre los costos de mantenimiento, como para los usuarios, por su incidencia sobre la comodidad y la seguridad de su circulación y sobre los costos de operación vehicular. Las características funcionales de un pavimento residen, fundamentalmente, en su capa de rodadura. Estos aspectos funcionales están asociados, principalmente, con la textura y la regularidad superficial. Las cualidades que se deben exigir a una capa de rodadura para que satisfaga estas funciones de seguridad y comodidad tienen que ver con:

- Regularidad superficial (comodidad y seguridad de rodadura)
- Adherencia neumático-pavimento (repercute en la seguridad de rodadura)

- Ruido de rodadura (comodidad e impacto ambiental)
- Visibilidad (seguridad y comodidad de circulación).

### **2.1.7.2. Características estructurales de los pavimentos**

La capacidad estructural está relacionada con la aptitud que tiene el pavimento (o el afirmado) para soportar adecuadamente el tránsito actual y futuro. Algunos tipos de deterioros que evidencian la debilidad estructural de los pavimentos pueden ser detectados visualmente, mientras otros exigen la toma de medidas continuas o intermitentes no destructivas para su detección o cuantificación. La acción de algunas acciones destructivas complementarias suele ser necesaria para realizar los diseños, calibrar los modelos de deterioro y obtener información fidedigna sobre las propiedades de los materiales de la calzada objeto de la evaluación.

### **2.1.7.3. Clasificación y cuantificación de los deterioros en pavimentos flexibles**

Los deterioros superficiales de un pavimento son indicadores externos de desperfectos producidos por las cargas del tránsito, factores ambientales, deficiencias de construcción o combinaciones de ellos, y constituyen el testimonio más evidente de su comportamiento en servicio.

Los deterioros pueden tener origen y efecto tanto funcional como estructural. Un deterioro funcional es aquel que afecta la aptitud del pavimento para proporcionar una superficie de rodamiento cómoda y/o segura y, por lo general, está motivado por alguna deficiencia de la capa de rodadura. La mayoría de los deterioros de este tipo se pueden corregir con simples tratamientos de mantenimiento periódico de fácil ejecución y bajo costo. Por el contrario, un deterioro estructural es promovido por la acumulación de cargas (fatiga), por un espesor insuficiente o por falta de soporte estructural. Su reparación suele ser costosa y puede requerir hasta la reconstrucción del pavimento si la gravedad y la extensión del deterioro así lo ameritan. Generalmente, la manera de manifestarse los deterioros funcionales y estructurales es diferente, razón por la cual la simple inspección visual brinda una idea aceptable en relación con la fuente del trastorno y con tipo de mantenimiento por aplicar.

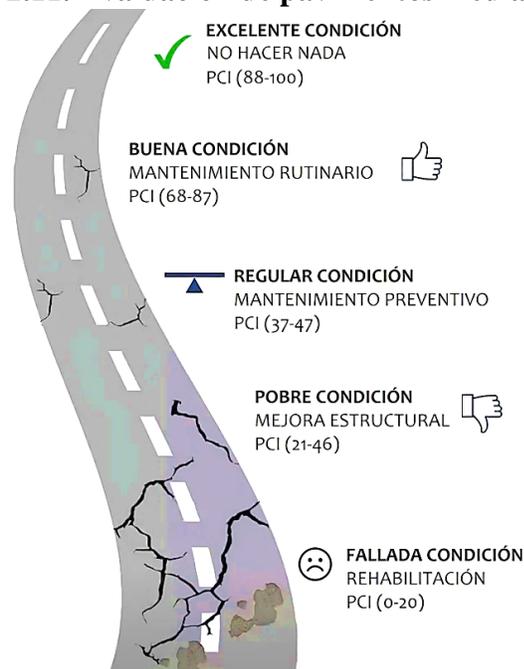
Normalmente, el inventario de los daños visibles es el primero de los pasos necesarios para evaluar la condición global de un pavimento. Esta información es la que determina la amplitud de las investigaciones posteriores, con el fin de llegar a una conclusión objetiva sobre la condición de la calzada objeto de la evaluación. Considerando que los deterioros típicos de origen funcional y estructural de los pavimentos asfálticos y los pavimentos rígidos son muy diferentes, su clasificación y valoración requieren la aplicación de procedimientos inherentes a cada uno de ellos.

El inventario de los deterioros de un pavimento se puede adelantar visualmente o de manera automatizada. Independientemente del procedimiento empleado, los datos recolectados se deben resumir de manera que brinden al ingeniero una imagen precisa de la condición existente en la superficie del pavimento o del afirmado.

#### 2.1.7.4. Índice de Condición del Pavimento PCI

Este método ha sido publicado por la ASTM como procedimiento estándar para la inspección del Índice de Condición del Pavimento en carreteras ASTM D6433-03.

**Figura 2.11. Evaluación de pavimentos mediante PCI**



**Fuente:** Envolve-Ingengería y Construcción. (2023, mayo). Evaluación de pavimentos PCI.

El objetivo que se espera con la aplicación del método PCI es determinar el estado en que se encuentra el pavimento en términos de su integridad superficial.

#### 2.1.7.4.1. Rangos de calificación del PCI

El PCI es un índice numérico que varía desde cero (0), para un pavimento fallado, hasta cien (100) para un pavimento en perfecto estado. En la tabla siguiente se observa los rangos PCI con la correspondiente descripción cualitativa de la condición del pavimento.

**Tabla 2.2. Clasificación del PCI**

Rango	Clasificación	
100–85	EXCELENTE	
85–70	MUY BUENO	
70–55	BUENO	
55–40	REGULAR	
40–25	MALO	
25–10	MUY MALO	
10–0	FALLADO	

**Fuente:** Vásquez Varela, L. R. (2002, febrero). Pavement condition index (PCI) para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras. Universidad Nacional de Colombia.

#### 2.1.7.4.2. Unidades de muestreo del PCI

Carreteras con capa de rodadura asfáltica y ancho menor que 7,30 m el área de la unidad de muestreo debe estar en el rango  $230 \pm 93 \text{ m}^2$ .

En la siguiente tabla se presentan algunas relaciones longitud–ancho de calzada.

**Tabla 2.3. Longitudes de unidades de muestreo**

Ancho de calzada [m]	Longitud de la unidad de muestreo [m]
5,00	46,00
5,50	41,80
6,00	38,30
6,50	35,40
7,30 (máximo)	31,50

**Fuente:** Vásquez Varela, L. R. (2002, febrero). Pavement condition index (PCI) para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras. Universidad Nacional de Colombia.

El número mínimo de unidades de muestreo que deben evaluarse se obtiene mediante la ecuación del número mínimo de unidades de muestra “n”, la cual produce un estimado del  $\text{PCI} \pm 5$  del promedio verdadero con una confiabilidad del 95%.

El número mínimo de unidades de muestra “n” a ser inspeccionadas en una sección dada, para obtener un valor estadísticamente adecuado (95% de confiabilidad), es calculado empleando la siguiente ecuación (Vásquez, 2002).

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

Donde:

n = Número mínimo de unidades a evaluar

N = Número total de unidades de muestreo en sección del pavimento

e = Error admisible en el estimativo del PCI de la sección (e= +/-5%)

$\sigma$  = Desviación estándar del PCI entre las unidades

En la siguiente tabla se tiene un criterio alternativo para determinar n.

**Tabla 2.4. Unidades de muestra a inspeccionar**

Total de unidades de muestra (N)	Unidades de muestra a inspeccionar (n)
1 a 5 unidades de muestras	1 unidad de muestra
6 a 10 unidades de muestras	2 unidades de muestra
11 a 15 unidades de muestras	3 unidades de muestra
16 a 40 unidades de muestras	4 unidades de muestra
Más de 40 unidades de muestras	10%

**Fuente:** Shahin, M. Y. (1994). Pavement management for airports, roads and parking lots.

#### 2.1.7.4.3. Intervalo de muestreo para la inspección

El número de sección (i) se expresa mediante la siguiente ecuación:

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

Donde:

N = Número total de unidades de muestro disponibles

n = Número mínimo de unidades para evaluar

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

#### 2.1.7.4.4. Evaluación de la condición

El procedimiento debe seguir estrictamente la definición de los daños de este manual para obtener un valor del PCI confiable.

**Tabla 2.5. Hoja de inspección de condiciones para unidad de muestra**

MÉTODO PCI (ÍNDICE DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO)				
ZONA DE ESTUDIO:				
<b>Progresiva Inicio:</b>		<b>Esquema:</b>		
<b>Progresiva Fin:</b>				
<b>Área (m<sup>2</sup>):</b>				
<b>Fecha:</b>				
<b>Unidad de muestra:</b>				
<b>Inspeccionado por:</b>				
<b>Falla</b>	<b>Unidad</b>	<b>Falla</b>	<b>Unidad</b>	
1.-Piel de cocodrilo	m <sup>2</sup>	11.-Parcheo	m <sup>2</sup>	
2.-Exudación	m <sup>2</sup>	12.-Agregado pulido	m <sup>2</sup>	
3.-Fisuras en bloque	m <sup>2</sup>	13.-Huecos	N°	
4.-Elevación–Hundimiento	m	14.-Acceso a puentes–rejillas de drenaje	m <sup>2</sup>	
5.-Corrugaciones	m <sup>2</sup>	15.-Ahuellamiento	m <sup>2</sup>	
6.-Depresiones	m <sup>2</sup>	16.-Deformación por empuje	m <sup>2</sup>	
7.-Fisuras de borde	m	17.-Deslizamiento	m <sup>2</sup>	
8.-Fisuras de reflexión de juntas	m	18.-Hinchamiento	m <sup>2</sup>	
9.-Desnivel carril–berma	m	19.-Disgregación–desintegración	m <sup>2</sup>	
10.-Fisuras long. y transversales	m			
<b>Tipo de Falla</b>	<b>Severidad</b>	<b>Total</b>	<b>Densidad</b>	<b>Valor deducido</b>

**Fuente:** Vásquez Varela, L. R. (2002, febrero). Pavement condition index (PCI) para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras. Universidad Nacional de Colombia.

#### 2.1.7.4.5. Cálculo del PCI para las unidades de muestreo

Al completar la inspección de campo, la información sobre los daños se utiliza para calcular el PCI. El cálculo puede ser manual o computarizado y se basa en los “Valores Deducidos” de cada daño de acuerdo con la cantidad y severidad reportadas.

#### **Etapa 1. Determinación de los valores deducidos (VD)**

- 1.a. Totalizar cada tipo y nivel de severidad de daño y registrarlo en la columna TOTAL, del formato inventario de daños, este puede medirse en área o longitud.

**1.b.** Dividir la cantidad de cada clase de daño, en cada nivel de severidad, entre el área total de la unidad de muestreo, y exprese el resultado como porcentaje, esta es la densidad del daño, con el nivel de severidad especificado dentro de la unidad.

**1.c.** Determinar el valor deducido para cada tipo de daño y su nivel de severidad mediante el uso de las curvas denominadas “Valor deducido del daño”.

## **Etapas 2. Cálculo del número máximo admisible de valores deducidos ( $m$ )**

**2.a.** Si ninguno o tan sólo uno de los “Valores Deducidos” es mayor que 2, se usa el “Valor Deducido Total” en lugar del mayor “Valor Deducido Corregido”, *CDV*, obtenido en la Etapa 4. De lo contrario, deben seguirse los pasos 2.b. y 2.c.

**2.b.** Listar los valores deducidos individuales deducidos de mayor a menor.

**2.c.** Determinar el “Número Máximo Admisibles de Valores Deducidos” ( $m$ ), utilizando la siguiente ecuación:

$$m_i = 1 + \frac{9}{98} * (100 - HDV_i)$$

Donde:

$m_i$  = Número máximo admisible de “valores deducidos”, incluyendo fracción, para la unidad de muestreo  $i$

$HDV_i$  = El mayor valor deducido individual para la unidad de muestreo  $i$

## **Etapas 3. Cálculo del máximo valor deducido corregido *CDV***

El máximo *CDV* se determina mediante el siguiente proceso iterativo:

**3.a.** Determinar el número de valores deducidos,  $q$ , mayores que 2.

**3.b.** Determinar el “Valor Deducido Total” sumando todos los valores deducidos individuales.

**3.c.** Determinar el *CDV* con  $q$  y el “Valor Deducido Total” en la curva de corrección pertinente al tipo de pavimento.

**3.d.** Reducir a 2 el menor de los “Valores Deducidos” individuales que sea mayor que 2 y repetir las etapas 3.a. a 3.c. hasta que  $q$  sea igual a 1.

**Tabla 2.6. Formato para las iteraciones del cálculo del CDV**

N°	Valores deducidos	Total	q	CDV
1				
2				
3				
4				

**Fuente:** Vásquez Varela, L. R. (2002, febrero). Pavement condition index (PCI) para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras. Universidad Nacional de Colombia.

#### **Etapa 4. Cálculo final del PCI**

Calcule el PCI de la unidad restando de 100 el máximo CDV obtenido en la etapa 3.

$$\text{PCI} = 100 - \text{Máx. CDV}$$

Donde:

PCI = Índice de condición del pavimento de la unidad

Máx.CDV = Máximo valor deducido corregido

#### **2.1.7.5. Índice de Regularidad Internacional IRI**

La sociedad americana de ensayos y materiales (ASTM) en la norma E-950 define la rugosidad como la desviación de la superficie del pavimento respecto a una superficie plana que afecta la dinámica de los vehículos, la calidad de los viajes, las cargas dinámicas y el drenaje. La rugosidad también puede ser definida como la distorsión de la superficie de la vía que causa aceleraciones verticales indeseables.

El IRI es una escala de la regularidad superficial de una vía, propuesta por el Banco Mundial como estadística estándar de la rugosidad que determina la influencia del perfil longitudinal de la carretera en la calidad de la rodadura.

El cálculo del índice de rugosidad internacional IRI está basado en el comportamiento del modelo matemático “Quarter Car”, que simula la función y las masas de la cuarta parte de un vehículo que circula por la vía a una velocidad promedio de 80 Km/h, la acumulación de los desplazamientos de vertical de las masas dividido entre la distancia recorrida, da como resultado el IRI en dimensiones de pendiente [m/Km] (Del Águila, 1999).

### 2.1.7.5.1. Factores que afectan la rugosidad de los pavimentos

Las investigaciones han demostrado que existen muchos factores que afectan la regularidad superficial del pavimento de estos lo más relevantes son:

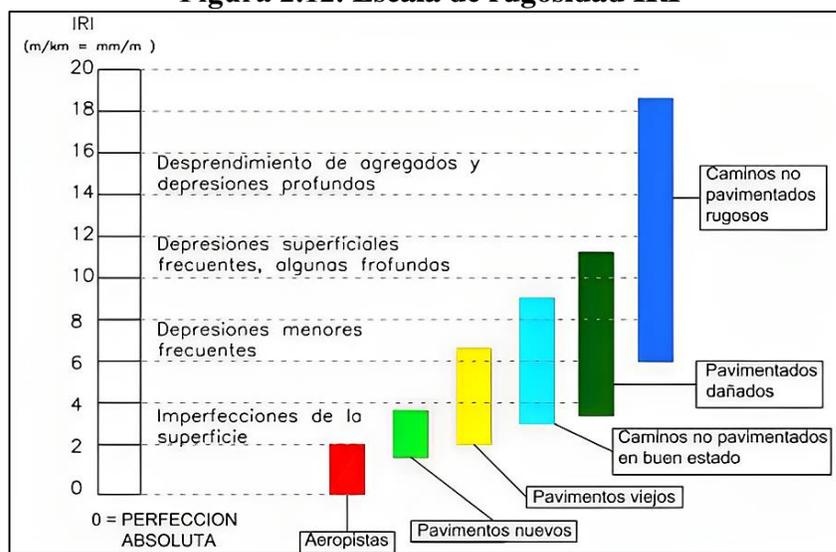
- Edad del pavimento
- Niveles de tráfico vehicular
- Espesores del pavimento
- Las propiedades de la mezcla asfáltica utilizada
- Las características del medio ambiente: Temperatura promedio, precipitaciones pluviales, índice de congelamiento, días con temperatura superior a 32°C
- Propiedades de la base granular y subrasante
- Extensión y severidad de las fallas en el pavimento.

### 2.1.7.5.2. Escala de valores IRI del Banco Mundial

El Banco Mundial en 1986 propuso las escalas de medición del IRI en pavimentos de concreto asfáltico, aquellos con tratamientos superficial y carreteras a nivel de afirmado.

Además de estas escalas de medición propuestas por el Banco Mundial, la norma ASTM E-950, también presenta una escala de medición de la regularidad (Del Águila, 1999).

**Figura 2.12. Escala de rugosidad IRI**



**Fuente:** Chambilla, E. D. (2021). Evaluación de pavimento flexible mediante método del rugosímetro de Merlín. Universidad Cesar Vallejo. Perú.

### 2.1.7.5.3. Clasificación del rango de rugosidad IRI

En la siguiente tabla se muestran los rangos establecidos para catalogar la rugosidad:

**Tabla 2.7. Calificación del IRI**

Rango de rugosidad (m/Km)	Calificación
0,0 – 2,0	Muy bueno
2,0 – 3,5	Bueno
3,5 – 5,0	Regular
> 5,0	Malo

**Fuente:** Del Águila, P. M. (1999). Metodología para la determinación de la rugosidad. España.

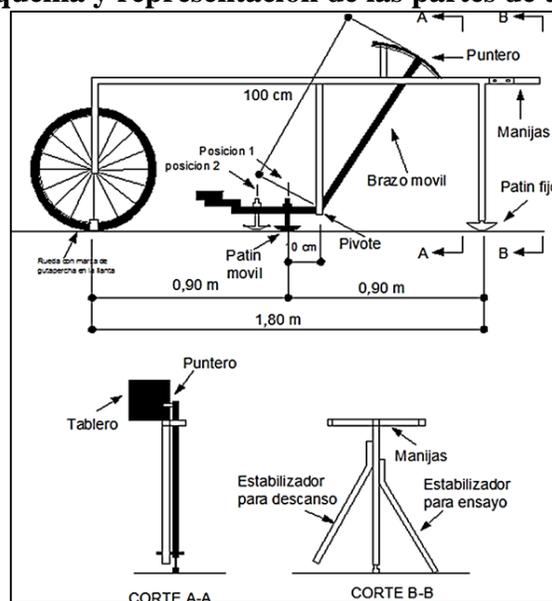
### 2.1.7.5.4. Rugosímetro Merlín

El Laboratorio Británico de Investigación de Transportes y Caminos (TRRL) desarrolló el Rugosímetro Merlín, basándose en el principio del perfilómetro estático.

El Merlín consta de las siguientes partes:

- Patín móvil
- Pivote
- Brazo móvil
- Puntero
- Manijas
- Patín fijo
- Tablero
- Estabilizador para ensayo

**Figura 2.13. Esquema y representación de las partes de un equipo Merlín**

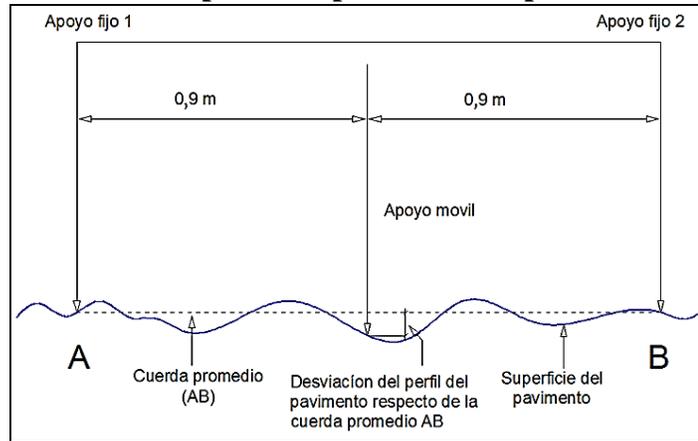


**Fuente:** Del Águila, P. M. (1999). Metodología para la determinación de la rugosidad. España.

### 2.1.7.5.5. Metodología para la determinación del IRI con el Merlín

La determinación de la rugosidad de un pavimento se basa en el concepto de usar la distribución de las desviaciones de la superficie respecto de una cuerda promedio. El Merlín mide el desplazamiento vertical entre la superficie del camino y el punto medio de una línea imaginaria de longitud constante (Del Águila, 1999).

**Figura 2.14. Desviación del perfil del pavimento respecto a la cuerda promedio**

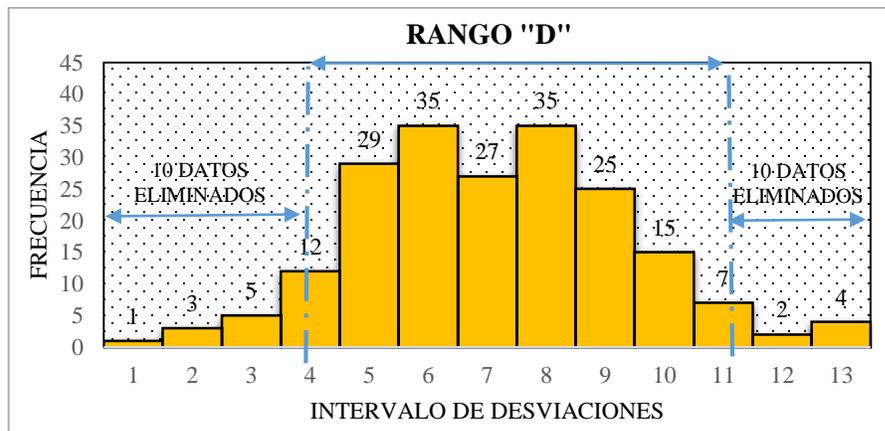


**Fuente:** Del Águila, P. M. (1999). Metodología para la determinación de la rugosidad. España.

#### 2.1.7.5.5.1. Histograma de la distribución de frecuencia

Se debe medir 200 desviaciones en forma continua para poder obtener el histograma, existe la posibilidad de medir dispersión de las desviaciones, en la figura que sigue se muestra el parámetro estadístico “D” que representa la rugosidad del pavimento en escala Merlín, luego de hacer la depuración de 5% (10 datos) a cada lado del histograma.

**Gráfico 2.1. Histograma de distribución de frecuencias**



**Fuente:** Del Águila, P. M. (1999). Metodología para la determinación de la rugosidad. España.

### 2.1.7.5.2. El tablero del Merlín

La relación entre el patín móvil – pivot y pivot – puntero es de 1 a 10, lo cual da entender que un movimiento en la parte inferior del patín móvil produce un desplazamiento de 1cm (10 mm) en el puntero.

Para registrar los movimientos del puntero, se utiliza una escala gráfica con 50 divisiones, de 5 mm de espesor cada una, que va adherida en el borde del tablero sobre el cuál se desliza el puntero (Del Águila, 1999).

Para comprender con mayor claridad lo explicado anteriormente, a continuación, se muestra el tablero y el formato para el registro de datos con la Rueda de Merlín.

**Figura 2.15. Tablero Merlín**

		Datos de campo con la Rueda de Merlín										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1 DIVISION = 5 mm	DEPRESIONES	50										
		49										
		48										
		47										
		46										
		45										
		44										
		43										
		42										
		41										
	40											
	39											
	38											
	37											
	36											
	35											
	34											
	33											
	32											
	31											
30												
29												
28												
27												
26												
25												
24												
23												
22												
21												
20												
19												
18												
17												
16												
15												
14												
13												
12												
11												
10												
9												
8												
7												
6												
5												
4												
3												
2												
1												
	ELEVACIONES	50										
		49										
		48										
		47										
		46										
		45										
		44										
		43										
		42										
		41										

**Fuente:** Del Águila, P. M. (1999). Metodología para la determinación de la rugosidad. España.

Las anotaciones de las observaciones realizadas deben ser hechas en una planilla. Los datos recolectados se deben representar en un histograma como parte del trabajo de gabinete de la evaluación de la rugosidad del pavimento (Del Águila, 1999).

#### **2.1.7.5.6. Cálculo de la rugosidad**

La dispersión de los datos obtenidos con el Merlín se analiza calculando la distribución de frecuencias de las lecturas o posiciones adoptadas por el puntero, la cual puede expresarse, para fines didácticos, en forma de histograma. Posteriormente se establece el rango de los valores agrupados en intervalos de frecuencia (D), luego de descartarse el 10% de datos que correspondan a posiciones del puntero poco representativas o erráticas. En la práctica se elimina 5% (10 datos) del extremo inferior del histograma y 5% (10 datos) del extremo superior.

##### **2.1.7.5.6.1. Factor de corrección para el ajuste de “D”**

La condición de relación de los brazos del Rugosímetro de 1 a 10 en ocasiones se cambia, como consecuencia del desgaste del patín del brazo móvil, lo cual debe ser ajustado con el factor de corrección “FC”. El procedimiento de obtención de “FC” se encuentra en: “Metodología para la Determinación de La Rugosidad de los Pavimentos, Pablo del Águila Rodríguez”. La ecuación a utilizar para el ajuste de “D” es:

$$F.C.=\frac{EP*10}{(LI-LF)*5}$$

Donde:

EP = Espesor de la pastilla

LI = Posición inicial del puntero

LF = Posición final del puntero

Al multiplicar el rango “D” por el F.C. se obtiene el valor de la rugosidad en “unidades Merlín”.

##### **2.1.7.5.6.2. Rugosidad en la escala del IRI**

Para transformar la rugosidad de unidades Merlín a la escala del IRI, se usa las expresiones.

- Cuando  $2,40 < \text{IRI} < 15,90$  entonces  $\text{IRI} = 0,593 + 0,0471 * D_C$
- Cuando  $\text{IRI} < 2,40$  entonces  $\text{IRI} = 0,0485 * D_C$

Calculado el IRI característico, el sector o tramo será aceptado si cumple con las siguientes condiciones:

- Para pavimentos asfálticos nuevos, el IRI deberá ser menor o igual a 2 m/km.
- Para pavimentos con recado asfáltico, el IRI deberá ser menor o igual a 2,5 m/km.
- Para pavimentos con sellado asfáltico, el IRI deberá ser menor o igual a 3 m/km.

En caso de no cumplirse con estos límites, el sector o tramo deberá subdividirse en secciones de rugosidad homogénea, y se calculará el IRI característico para cada una de ellas, los que deberán cumplir los límites indicados.

#### **2.1.7.5.6.3. IRI característico**

Para el caso de pavimentos asfálticos, la rugosidad o regularidad superficial se deberá controlar calculando el parámetro denominado IRI Característico, el cuál es definido por la siguiente expresión:

$$\text{IRI}_c = \text{IRI}_p + t * \sigma$$

Donde:

$\text{IRI}_c$ = IRI característico

$\text{IRI}_p$ = IRI promedio

$t$ = Constante de probabilidad al 95%

$\sigma$ = Desviación estándar

De acuerdo con la constante de probabilidad ( $t=1,645$ ), se cumplirá que el 95% del pavimento experimentará una rugosidad igual o menor al IRI característico (Del Águila, 1999).

#### **2.1.7.6. Evaluación estructural**

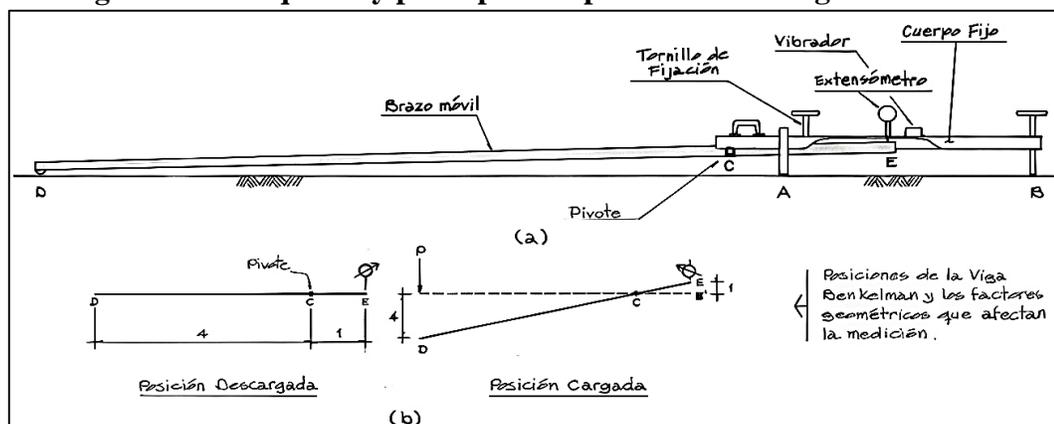
La evaluación estructural de pavimentos consiste, básicamente, en la determinación de la capacidad resistente del sistema en una estructura vial, en cualquier momento de su vida

de servicio, para establecer y cuantificar las necesidades de rehabilitación. La necesidad de evaluar estructuralmente los pavimentos aumenta a medida que se completa el periodo de diseño, y consecuentemente aumenta la necesidad de su preservación y rehabilitación.

### 2.1.7.6.1. La Viga Benkelman

Las deflexiones producidas en la superficie de un pavimento flexible, por acción de cargas vehiculares, pueden ser determinadas haciendo uso de deflectómetros tales como el denominado "Viga Benkelman". Llamado así en honor al Ing. A.C. Benkelman, quién la desarrolló en 1953 como parte del programa de ensayos viales de la ASSHO Road Test. Desde entonces su uso se ha difundido ampliamente en proyectos de evaluación estructural de pavimentos flexibles, tanto por su practicidad como por la naturaleza directa y objetiva de los resultados que proporciona.

**Figura 2.16. Esquema y principio de operación de la Viga Benkelman**



**Fuente:** Del Águila Rodríguez, P. M. (1985, octubre). Estudios de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones.

### 2.1.7.6.2. Equipo para la medición de deflexiones

El equipo mínimo para la realización de los ensayos de medición de deflexiones es el siguiente:

- Deflectómetro Viga Benkelman
- Camión cargado con eje trasero de 18000 libras igualmente distribuidas en un par de llantas dobles infladas a una presión de 75 a 85 psi
- Accesorios de medición y otros como ser: cinta métrica, hojas de campo, señales de seguridad, termómetro, etc.

**Figura 2.17. Deflectómetro “Viga Benkelman”**



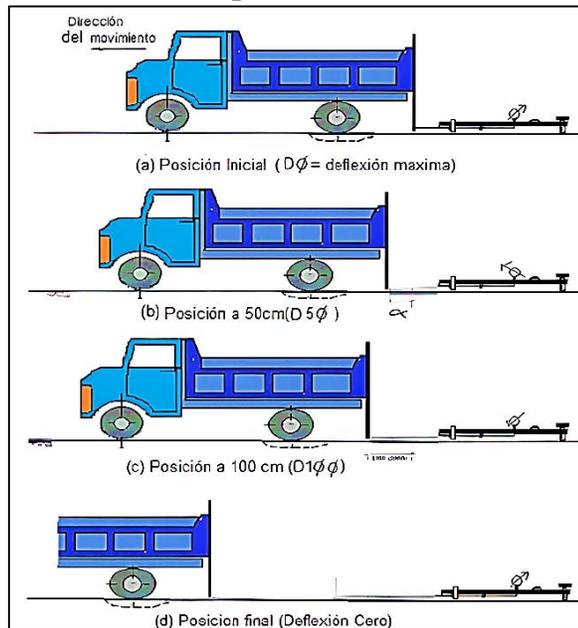
**Fuente:** Elaboración propia.

### **2.1.7.6.3. Procedimiento para la medición de deflexiones**

Para realizar los ensayos de medición de deflexiones se debe seguir el siguiente proceso:

- Carga y pesaje de la volqueta, debe tener un peso en el eje trasero de 8,20 Ton (18000 lb) puede tener una variación en el orden de  $\pm 1\%$
- Posicionamiento de la volqueta en el punto a ensayar, las ruedas gemelas deben estar situadas sobre la huella de circulación de los vehículos
- Centrado del extremo delantero de la Viga Benkelman en la proyección vertical del centro de gravedad del eje trasero, debe situarse en el medio del par de ruedas
- Nivelación de la viga, colocación del extensómetro y puesta en cero del mismo, esta posición se asumirá como 100 o 200
- Anotar las lecturas del dial en el estado inicial (deflexión máxima), a 0,50 m y cuando el pavimento este totalmente libre de deflexión ( $>5$  m)
- Repetir este procedimiento en cada uno de los puntos de ensayo.

**Figura 2.18. Esquematzación del proceso de medición con la Viga Benkelman**



**Fuente:** Del Águila Rodríguez, P. M. (1985, octubre). Estudios de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones.

#### 2.1.7.6.4. Deflexión máxima

$$D_0 = K * (L_f - L_0)$$

Donde:

$D_0$  = Deflexión máxima (0,01 mm)

$K$  = Constante de la Viga Benkelman depende de la relación de brazos y de la calibración

$L_0$  = Lectura inicial (0,01 mm)

$L_f$  = Lectura final (0,01 mm)

#### 2.1.7.6.5. Deflexión media a la distancia de 50 cm

$$D_{50} = K * (L_f - L_{50})$$

Donde:

$D_{50}$  = Deflexión a 50 cm (0,01 mm)

$K$  = Constante de la Viga Benkelman depende de la relación de brazos y de la calibración

$L_{50}$  = Lectura a 50 cm de la posición inicial (0,01 mm)

$L_f$  = Lectura final (0,01 mm)

#### 2.1.7.6.6. Factor de corrección por temperatura

El asfalto tiene un comportamiento visco-elástico, por tanto, las deflexiones son afectadas directamente por la temperatura.

$$F_T = \frac{1}{k * (t - 20^{\circ}\text{C}) * e + 1}$$

Donde:

$F_T$  = Factor de corrección por temperatura

$K$  = Coeficiente de temperatura ( $8 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ )

$T$  = Temperatura del asfalto medida para cada ensayo ( $^{\circ}\text{C}$ )

$E$  = Espesor de la carpeta asfáltica (cm)

#### 2.1.7.6.7. Factor de corrección por estacionalidad

La correcta medición de las deflexiones debería ser en época de lluvias, ya que el grado de saturación de los suelos tiene influencia directa en la deformación de los suelos.

**Tabla 2.8. Factor de corrección por estacionalidad ( $F_E$ )**

Tipo de suelo subrasante	Estación lluviosa	Estación seca
Arenosa – Permeable	1,00	1,10 a 1,30
Arcillosa – sensible al agua	1,00	1,20 a 1,40

**Fuente:** Del Águila Rodríguez, P. M. (1985, octubre). Estudios de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones.

#### 2.1.7.6.8. Deflexiones corregidas

Las deflexiones obtenidas se deben afectar por los factores de corrección

$$D_0' = D_0 * F_T * F_E$$

$$D_{50}' = D_{50} * F_T * F_E$$

#### 2.1.7.6.9. Radio de curvatura

El método asume que la curvatura que experimenta la superficie del pavimento, durante la aplicación de la carga, es de forma parabólica, en un segmento de aproximadamente 25 cm. a partir del punto de máxima deflexión.

$$RC' = \frac{10 * 25^2}{K * (D_0' - D_{50}')}$$

Donde:

RC' = Radio de curvatura (m)

D<sub>0</sub>' = Deflexión máxima corregida (0,01 mm)

D<sub>50</sub>' = Deflexión a 50 cm corregida (0,01 mm)

#### 2.1.7.6.10. Deflexión admisible

La deflexión admisible se calculó por medio del criterio de Yang H. Huang:

$$D_{adm} = 26,32202 * ESAL's^{(-0,2438)}$$

Donde:

D<sub>adm</sub> = Deflexión admisible (mm)

ESAL's = Número de Ejes Equivalentes de 8,20 Ton para el periodo de diseño

El pavimento sujeto a evaluación tendrá capacidad estructural suficiente si:

$$(D_0' < D_{adm})$$

Un pavimento evaluado se considera satisfactorio cuando se cumplen estas condiciones:

a) Los valores de radio de curvatura calculados son mayores de 100 m

$$(RC' > 100 \text{ m})$$

b) El radio de curvatura promedio está comprendido entre 300–500 m

$$(300 < RC' < 500)$$

### 2.1.7.6.11. Deflexión media

Gauss determina la deflexión media ( $D_m$ ), la desviación estándar ( $\sigma$ ) y el coeficiente de variación ( $C_v$ ), para ello se usaron las siguientes expresiones donde “n” es el número de datos (todos estos datos estadísticos sirven para determinar la deflexión característica).

$$D_m = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n} \qquad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - D_m)^2}{(n - 1)}} \qquad C_v = \frac{\sigma}{D_m} * 100$$

Donde:

$D_m$  = Deflexión media (0,01 mm)

$D_i$  = Deflexión recuperable máxima corregida (0,01 mm)

n = Número de datos

$\sigma$  = Desviación estándar

$C_v$  = Coeficiente de variación

### 2.1.7.6.12. Deflexión característica

(CONREVIAl, 1983). Es un valor que representa mejor a una determinada sección, siguiendo el criterio adoptado normalmente en análisis estadísticos, se establece como deflexión característica el valor:

$$D_c = D_m + t * \sigma$$

Donde:

$D_c$  = Deflexión característica (0,01 mm)

$D_m$  = Deflexión promedio de los valores  $D_o$  (0,01 mm)

$\sigma$  = Desviación estándar

t = Coeficiente porcentual del área con probabilidad de superar  $D_c$

El valor de “t” corresponderá a un porcentaje del área total con probabilidad de presentar deflexiones superiores a la característica  $D_c$  correspondiente.

## **2.1.8. Técnicas para el mantenimiento y rehabilitación de pavimentos flexibles**

Las actividades de mantenimiento de las calzadas pavimentadas comprenden desde tareas elementales hasta operaciones bastante elaboradas, que se pueden dividir en rutinarias y periódicas dependiendo de las características del trabajo por efectuar y de la periodicidad con que se requiere realizarlas.

### **2.1.8.1. Técnicas para el mantenimiento rutinario de pavimentos flexibles**

Las actividades de mantenimiento rutinario más importantes en las calzadas asfálticas son el sellado de grietas y las operaciones de parcheo y bacheo.

#### **2.1.8.1.1. Tratamiento de grietas**

El tratamiento de grietas consiste en su eventual conformación, su limpieza y la aplicación de un producto sellante, en frío o en caliente, cuyas características técnicas y cantidades dependen de la abertura de la grieta. El procedimiento es apropiado para tratar grietas de tipo longitudinal, transversal y en bloque cuyo ancho se encuentre entre 3 y 25 mm, pero no se debe emplear para enfrentar patrones interconectados como los del tipo piel de cocodrilo, ni para tratar grietas de borde causadas por sobrecarga, fallas por corte o erosión de la berma o las parabólicas producidas por baja estabilidad de la mezcla o por falta de adherencia entre las capas asfálticas y la subyacente. Tampoco resulta apropiado en pavimentos semirrígidos, si en las capas asfálticas existentes permanecen grietas de retracción o reflexión, caso en el cual lo más procedente es el uso de un sistema de prevención del reflejo para minimizar el efecto perjudicial de la reflexión superficial.

**Figura 2.19. Sellado de grietas**



**Fuente:** INVIAS. (2016). Manual de mantenimiento de carreteras. Colombia.

### **2.1.8.1.2. Parcheo y bacheo**

Este tratamiento consiste en la intervención de áreas localizadas del pavimento para corregir defectos relacionados con un deterioro estructural o problemas de humedad, de materiales o de construcción. La intervención puede abarcar sólo las capas asfálticas (parcheo) o comprender también las granulares o estabilizadas hasta lograr un apoyo firme (bacheo), dependiendo de la naturaleza del deterioro.

Al igual que en el caso del sellado de grietas, el parcheo y el bacheo se pueden realizar como tratamientos únicos, caso en el cual se constituyen actividades de mantenimiento rutinario, o como preparación de la superficie del pavimento para una actividad de mantenimiento periódico o de refuerzo estructural. Cualquiera sea el caso, el parcheo y el bacheo constituyen uno de los tratamientos más costosos del mantenimiento de los pavimentos asfálticos.

El trabajo descrito comprende las siguientes actividades:

- Demarcación de las áreas por excavar, las cuales deben ser ligeramente más amplias que las que reflejan los deterioros, haciendo uso de figuras geométricas, cuadradas o rectangulares, cuyas caras longitudinales y transversales deberán ser, respectivamente, paralelas y perpendiculares al eje de la carretera.
- Corte, mediante aserrado, de las capas asfálticas de las áreas delimitadas, asegurando que las paredes excavadas sean verticales y uniformes. Si se trata de una operación de parcheo y las capas asfálticas son espesas, el corte se llevará hasta encontrar una capa asfáltica sana (se recomienda que el espesor del parche sea, cuando menos, 50 % superior al espesor asfáltico fallado). Si las capas asfálticas no son espesas o se ha determinado que la operación por realizar es de bacheo, el corte abarcará la totalidad del espesor de las capas asfálticas.
- Si se trata de una operación de parcheo, demoler la capa afectada, preferentemente con un martillo neumático, y remover el material de la excavación. Si se trata de una operación de bacheo, se excavará empleando un equipo apropiado para las dimensiones y ubicación del área sometida a reparación, hasta la profundidad señalada por el representante del Instituto en el sitio y se removerá la totalidad del material excavado, de manera que el fondo de la excavación sea plano, uniforme y

firme. Si la extensión del área por parchar lo permite, el corte y la remoción de la capa asfáltica deteriorada se pueden realizar con una máquina fresadora.

- Si el fondo expuesto de la excavación corresponde a una capa granular o a un suelo, se deberá compactar de manera que se alcance la densidad requerida por la especificación aplicable, en un espesor no menor de 15 cm.
- Dependiendo de la profundidad de la excavación, ésta se podrá rellenar empleando materiales granulares de subbase y/o base granular y, en todos los casos, de mezcla asfáltica hasta alcanzar un nivel de 3 a 6 mm por encima de la rasante del pavimento que se repara, con el fin de evitar acumulaciones de agua y tener en cuenta la compactación adicional que produce el tránsito automotor. Estos materiales se deberán colocar en los espesores y compactar a los niveles de densidad exigidos en los documentos aplicables al proyecto. En el caso de las capas asfálticas, tanto la superficie que las va a recibir como las paredes de la excavación se deberán pintar con un riego de liga empleando una emulsión asfáltica de rotura rápida en una dosis aproximada de 1 litro/m<sup>2</sup>.
- Si la excavación es pequeña y la mezcla se debe aplicar manualmente, se esparcirá siempre con pala y no con rastrillo, con el fin de prevenir su segregación.
- Si el parcheo o bacheo se realiza solamente como operación de mantenimiento rutinario y, por lo tanto, va a quedar expuesto al tránsito, los bordes del parche se deberán sellar para prevenir el ingreso de agua u otras sustancias deletéreas.

**Figura 2.20. Parcheo**



**Fuente:** INVIAS. (2016). Manual de mantenimiento de carreteras. Colombia.

### **2.1.8.2. Técnicas para el mantenimiento periódico de pavimentos flexibles**

Si se define que las actividades de mantenimiento periódico constituyen la mejor opción para intervenir el pavimento asfáltico en un instante determinado, lo que corresponde es identificarlas. El mantenimiento periódico no es apropiado para el tratamiento de los deterioros de tipo estructural. Ellos se deben enfrentar siempre mediante el diseño de obras de rehabilitación sobre una base de proyecto.

#### **2.1.8.2.1. Descripción de técnicas usuales de mantenimiento periódico**

Los trabajos de mantenimiento periódico de un pavimento asfáltico están enfocados, típicamente, a solucionar una necesidad de tipo funcional como, por ejemplo, mejorar la fricción superficial o impermeabilizar la superficie del pavimento. No obstante, algunos de ellos pueden cumplir varias funciones y así se ejecuten por una razón específica, suelen satisfacer simultáneamente otras necesidades secundarias. Las principales funciones del mantenimiento periódico de un pavimento asfáltico son las siguientes:

- Suministrar una nueva superficie de rodamiento
- Impermeabilizar la superficie
- Mejorar el drenaje superficial
- Mejorar la fricción superficial
- Reducir la rata de degradación del pavimento
- Mejorar la apariencia de la calzada
- Reducir el ruido de rodadura
- Proporcionar una diferencia visual entre la calzada y las bermas

Prácticamente todas las técnicas de mantenimiento periódico dan lugar a una nueva superficie de rodamiento, adecuada a las necesidades funcionales y de durabilidad del pavimento. Aquellas que incluyen la aplicación de agregados pétreos suelen ser aplicadas específicamente para mejorar las características de desgaste de la estructura y la seguridad de los usuarios. Un tratamiento superficial, por ejemplo, proporciona una nueva capa de agregado expuesta al tránsito, la cual puede suministrar mejores características de durabilidad y de resistencia a la abrasión que la superficie original. El tratamiento

superficial incrementa también la macrotextura del pavimento, lo que se traduce en el mejoramiento del drenaje superficial de la calzada. Un resultado similar se puede lograr con una lechada asfáltica, con un microaglomerado o con una mezcla drenante. Esta última, además, constituye el único medio realmente efectivo y económico para disminuir el ruido producido en el contacto entre los neumáticos de los vehículos y el pavimento.

Salvo las mezclas drenantes, las técnicas de mantenimiento periódico cumplen el propósito de impermeabilizar el pavimento cubriendo las fisuras y las áreas segregadas permeables, restringiendo así la infiltración de agua y reduciendo la velocidad con la cual se deteriora el pavimento. Algunos pavimentos asfálticos presentan síntomas de envejecimiento sin acusar otros defectos de importancia. En ellos, la aplicación de sellos del tipo niebla, lechadas asfálticas o tratamientos superficiales puede constituir una solución satisfactoria. Las acciones de mantenimiento periódico dan lugar, además, a un marcado mejoramiento de la apariencia superficial de un pavimento asfáltico.

En los siguientes subtítulos, se resumen las principales técnicas de mantenimiento periódico de un pavimento asfáltico, indicando los principales propósitos de ellas.

#### **2.1.8.2.1.1. Sello tipo niebla**

Aunque su finalidad general es proteger la superficie contra la degradación, un sello del tipo niebla se puede aplicar con dos propósitos diferentes: (1) mejorar la impermeabilidad de un pavimento nuevo o relativamente nuevo (edad inferior a 2 años) que presente síntomas de disgregación o escasez en la dosificación del asfalto o, simplemente, mejorar su apariencia y rejuvenecer una capa de rodadura debido a la oxidación del ligante.

**Figura 2.21. Sello tipo niebla**



**Fuente:** INVIAS. (2016). Manual de mantenimiento de carreteras. Colombia.

#### **2.1.8.2.1.2. Sello de arena–asfalto**

Consiste en la aplicación de un material bituminoso, generalmente una emulsión de rotura rápida, sobre la superficie del pavimento, seguida por la extensión y la compactación de una capa delgada de arena. El sello cumple, básicamente, la misma función que el riego en negro, pero, además, ofrece mejores condiciones de fricción superficial debido a la adición de una cantidad sustancialmente mayor de agregado pétreo. Su expectativa de vida es similar a la de los riegos en negro.

**Figura 2.22. Sello de arena–asfalto**



**Fuente:** INVIAS. (2016). Manual de mantenimiento de carreteras. Colombia.

#### **2.1.8.2.1.3. Tratamiento superficial**

Consiste en aplicaciones sucesivas de una emulsión asfáltica de rotura rápida y capas de gravilla de tamaño uniforme. Su construcción sobre un pavimento existente sirve para impermeabilizar y rejuvenecer la superficie, pero, principalmente, para mejorar las características de drenaje y de fricción superficial. Cuando se construyen en condiciones favorables, los tratamientos superficiales de mantenimiento pueden cumplir adecuadamente su función durante períodos de 5 a 7 años.

#### **2.1.8.2.1.4. Lechada asfáltica**

Consiste en una mezcla de emulsión asfáltica de rotura lenta, agua, agregado fino, llenante mineral y, eventualmente, aditivos, que se realiza en una máquina mezcladora especial que se encarga también de extenderla sobre la superficie del pavimento. Debido a que la lechada es muy rígida, el pavimento que se va a cubrir con ella deberá ser estable, sin deformaciones excesivas ni grietas que puedan sufrir movimientos bajo la acción del tránsito automotor. Su expectativa de vida útil se encuentra entre 3 y 5 años.

**Figura 2.23. Lechada asfáltica**



**Fuente:** INVIAS. (2016). Manual de mantenimiento de carreteras. Colombia.

#### **2.1.8.2.1.5. Sello del Cabo (“Cape seal”)**

Consiste en la aplicación de un tratamiento superficial simple sobre un pavimento existente y, luego de algún tiempo (típicamente tres semanas), la de una lechada asfáltica sobre el tratamiento terminado. La construcción conjunta de estos dos tratamientos combina las principales características favorables de ambos: el tratamiento superficial aporta principalmente impermeabilización y resistencia al deslizamiento, mientras que la lechada brinda lisura, reduce el nivel del ruido de rodadura y evita el desprendimiento de partículas típico de los tratamientos superficiales. Por ser una técnica de restauración con los mismos propósitos de los dos tratamientos que combina, no es recomendable su construcción sobre pavimentos con problemas estructurales. La vida útil de esta superficie de rodadura puede alcanzar 8 o más años.

**Figura 2.24. Cape seal**



**Fuente:** INVIAS. (2016). Manual de mantenimiento de carreteras. Colombia.

#### **2.1.8.2.1.6. Microaglomerado en frío**

Llamado también micropavimento, es una lechada asfáltica elaborada con una emulsión de asfalto modificado con polímeros y un agregado pétreo de tamaño máximo ligeramente mayor al empleado para la fabricación de la lechada convencional. Aunque cumple las mismas funciones de la lechada en la restauración de un pavimento, la modificación del ligante hace que el microaglomerado sea utilizable en carreteras de alto volumen de tránsito.

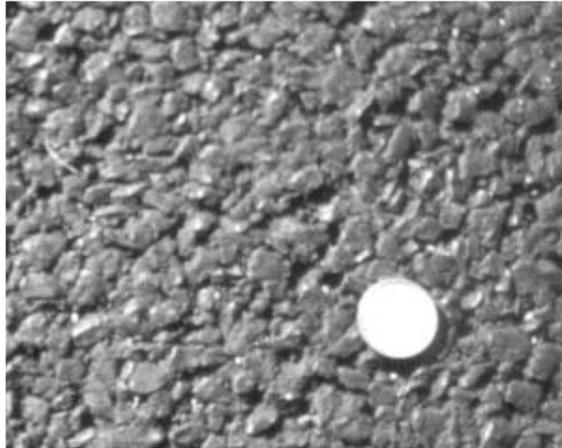
Los microaglomerados en frío también se pueden utilizar para rellenar zonas ahuelladas de poca profundidad, siempre y cuando ellas no obedezcan a baja resistencia a la deformación plástica de la capa de rodadura. Debido a su naturaleza frágil, su acción como tratamiento sellante de fisuras no suele ser muy eficaz. Colocados en condiciones favorables, su expectativa de vida supera los 5 años.

#### **2.1.8.2.1.7. Microaglomerado en caliente**

Es una mezcla asfáltica elaborada en caliente con agregados de gradación discontinua, que se emplea para construir capas de rodadura de poco espesor. Se elabora con un asfalto modificado con polímeros o con asfalto-caucho, eventualmente con la incorporación de fibras naturales o artificiales, y con un agregado pétreo que presenta una discontinuidad granulométrica entre los tamaños de 2 mm y 5 mm, con el fin de obtener una textura macrorrugosa al compactar la capa en el terreno. Las fibras incorporadas al esqueleto mineral ejercen un papel doble. Inicialmente, permiten fijar un mayor contenido en ligante debido al aumento que producen en la superficie específica a envolver, lo que se traduce en una película de ligante más gruesa sin riesgo de escurrimiento, interesante desde el punto de vista del envejecimiento y favorable por tanto a la durabilidad de la mezcla.

Los microaglomerados en caliente son útiles en la restauración de pavimentos que tengan una base firme, que no estén deformados y que presenten moderados síntomas de desprendimiento o de agrietamiento o problemas de deslizamiento o de envejecimiento. No se recomienda su empleo sobre capas asfálticas con exudaciones pronunciadas, ya que los excesos de asfalto se reproducen rápidamente en la superficie. Su expectativa de vida se encuentra entre 5 y 8 años.

**Figura 2.25. Textura superficial de un microaglomerado en caliente**



**Fuente:** INVIAS. (2016). Manual de mantenimiento de carreteras. Colombia.

#### **2.1.8.2.1.8. Fresado**

Es un proceso realizado por un equipo provisto de un cilindro rotatorio, con dientes de alta dureza, que cuenta con un sistema de nivelación automática y que opera con buena precisión. El fresado consiste en la molienda (generalmente en frío) de la parte superior de un pavimento para corregir sus perfiles longitudinal y transversal, removiendo abultamientos, baches, excesos de asfalto, grietas descendentes de poca profundidad y otras imperfecciones de la capa de rodadura sin afectar las capas inferiores, dejando una superficie de macrotextura rugosa y nivelada de elevada resistencia al deslizamiento.

Este tratamiento suele preceder la colocación de una nueva capa asfáltica que compense la pérdida de espesor que origina o, inclusive, que mejore la capacidad estructural del pavimento.

**Figura 2.26. Fresado**



**Fuente:** INVIAS. (2016). Manual de mantenimiento de carreteras. Colombia.

### **2.1.8.3. Técnicas para la rehabilitación de pavimentos flexibles**

#### **2.1.8.3.1. Sobrecapa de refuerzo**

Una Sobrecapa se construye para mejorar las condiciones funcionales incrementar su capacidad estructural para soportar tránsito futuro.

Las sobrecapas de refuerzo en concreto asfáltico han constituido el método más generalizado para rehabilitar pavimentos asfálticos por cuanto, generalmente, representan un medio efectivo en costo para corregir las deficiencias superficiales y, simultáneamente, incrementar la capacidad estructural del pavimento. Sin embargo, no es raro que el comportamiento de las sobrecapas asfálticas haya sido deficiente. Los motivos para que ello suceda son variados.

- Inadecuada selección de la sobrecapa como método de rehabilitación
- Escogencia de un tipo inapropiado de sobrecapa
- Espesor insuficiente de la sobrecapa
- Fallas en el diseño y en la elaboración de la mezcla
- Deficiente reparación previa de las áreas deterioradas
- Inadecuada consideración del fenómeno de reflexión de fisuras
- Deficiencias en el proceso constructivo.

El éxito de una sobrecapa de refuerzo descansa, primero que todo, en la certeza de que ella constituye la solución de rehabilitación apropiada. Establecido lo anterior, la determinación del tipo y del espesor del refuerzo son asuntos de importancia, así como la definición del tratamiento requerido por el pavimento antes de su colocación. Por último, es preciso que el proceso constructivo esté, en un todo, de acuerdo con las exigencias de las especificaciones de construcción.

El tipo más común de sobrecapa es que se construye con mezclas densas en caliente del tipo concreto asfáltico, elaboradas con cementos asfálticos convencionales o modificados con polímeros, aunque, en el caso de espesores importantes de refuerzo, es posible el empleo de otras clases de mezclas en la construcción de las capas intermedia y de base.

El espesor necesario de refuerzo depende del problema que afecte al pavimento existente, pero, en general, varía entre 40 mm y 200 mm. A menudo, las capas de refuerzo se aplican previo el fresado del pavimento. El fresado constituye un medio idóneo para recuperar la pendiente transversal de la calzada, mantener la altura de los sardineles en zonas urbanas y preparar el pavimento para la colocación de la sobrecapa. El espesor removido mediante el fresado debe ser tenido en cuenta en el instante de diseñar el espesor del refuerzo. La condición del pavimento antes de la aplicación del refuerzo afecta significativamente el comportamiento de éste.

**Figura 2.27. Recapado con mezcla asfáltica**



**Fuente:** INVIAS. (2016). Manual de mantenimiento de carreteras. Colombia.

#### **2.1.8.3.2. Tratamiento previo al refuerzo**

El tipo y la cantidad de los trabajos de tratamiento previos al refuerzo dependen del tipo y de la condición del pavimento por rehabilitar. Para que el refuerzo tenga un comportamiento satisfactorio, el pavimento existente deberá ser estructuralmente sano y encontrarse limpio y en capacidad de adherirse adecuadamente al refuerzo. Para cumplir estos requisitos, los trabajos de preparación se deben determinar cuidadosamente, teniendo en cuenta los siguientes factores:

- Tipo de materiales por emplear en el refuerzo
- Suficiencia estructural del pavimento existente
- Tipos, extensiones y gravedades de los deterioros del pavimento
- Costos totales (tratamiento previo y refuerzo).

En general, han existido dos maneras básicas de enfrentar el problema del diseño del refuerzo. La primera, consiste en considerar el bacheo de todas las áreas deterioradas antes de colocar la sobrecapa. La segunda, consiste en la colocación de un espesor de sobrecapa lo suficientemente importante (incluyendo una capa de nivelación, de ser necesaria) para proteger todas las áreas débiles que tenga el pavimento. Bajo este último concepto, si se determina que las capas de subbase o base presentan un elevado grado de deterioro, la capa afectada no se remueve, sino que, a través de un aumento del espesor del refuerzo, ella se protege contra los esfuerzos y deformaciones excesivos.

### **2.1.8.3.3. Oportunidad para el refuerzo**

El conocimiento de las curvas de evolución del deterioro del pavimento es muy útil en la definición del instante óptimo para la colocación del refuerzo. Los costos de los usuarios, la magnitud de los trabajos previos al refuerzo, el espesor de éste y los costos asociados a las obras son afectados por la intensidad de deterioro del pavimento.

En cualquier pavimento, los costos de los usuarios se incrementan rápidamente a medida que el nivel de servicio disminuye. Dichos costos incluyen los correspondientes a la operación y al mantenimiento del vehículo, el tiempo de los pasajeros y los accidentes. Al ir decreciendo el nivel de servicio, van apareciendo nuevos deterioros en el pavimento, los cuales exigen reparaciones mayores, generalmente en términos de bacheos, antes de la colocación del refuerzo.

## **2.2. Marco normativo**

Las metodologías adoptadas para la auscultación del pavimento se basan en las siguientes normativas:

- Índice de condición del pavimento PCI, ASTM D6433-03
- Índice de regularidad internacional IRI, ASTM E950
- Viga Benkelman, ASTM D4695-03.

### 2.3. Marco referencial

**Tipo de trabajo:** Aspectos informativos de los procedimientos y requerimientos del mantenimiento de carreteras

**Título:** “Manual de mantenimiento de carreteras”

**Autor:** Instituto nacional de vías–INVIAS

**Año:** 2016

**Origen:** Bogotá–Colombia

**Contribución:** Con el manual referenciado, se trabajó gran parte del Capítulo II, extrayendo conceptos e ilustraciones referidas al tema de interés.

**Tipo de trabajo:** Proyecto de suficiencia profesional

**Título:** “Evaluación superficial del pavimento de la carretera interoceánica norte Perú–Brasil aplicando el método PCI”

**Autor:** Luis Ángel Muñoz Salazar

**Año:** 2018

**Origen:** Universidad Privada del Norte, Lima–Perú

**Contribución:** Esta investigación tributó aclarando algunas dudas que se tuvo a la hora de realizar el cálculo e interpretación de resultados de la metodología PCI.

**Tipo de trabajo:** Consultoría al Ministerio de Transportes y Comunicaciones

**Título:** “Capacitación en el manejo del HDM-4 para evaluación de proyectos de infraestructura vial”

**Autor:** Ing. Fernando Abraham Pigrau

**Año:** 2012

**Origen:** Lima–Perú

**Contribución:** Fue clave aportando información para realizar la planificación con el software HDM-4 de los trabajos de mantenimiento y rehabilitación necesarios en el tramo analizado.

#### **2.4. Análisis del aporte teórico**

En general todo el marco conceptual seleccionado para el desarrollo del presente trabajo de investigación fue de gran importancia debido a que los conceptos, teorías, categorías y normativas aplicadas se logran relacionar apropiadamente con el interés investigativo.

Uno de los criterios que se tuvo a la hora de seleccionar el respaldo científico fue que las bases teóricas proporcionan fundamentación conceptual de mucha credibilidad ya que se desarrollaron por especialistas en el tema de interés. Otro criterio tomado en cuenta para filtrar la gran cantidad de teorías encontradas y que las mismas tributen de la mejor manera en el problema de investigación, fue que estos respaldos sean los adecuados para aplicar en nuestro medio, con los mismos instrumentos y de fácil acceso. De esta manera comparar la similitud y diferencias a la hora de recolectar los datos y resultados obtenidos por otros con respecto a los que están en discusión.

**CAPÍTULO III**  
**DISEÑO METODOLÓGICO Y**  
**RELEVAMIENTO DE LA**  
**INFORMACIÓN**

## CAPÍTULO III

### DISEÑO METODOLÓGICO Y RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

#### 3.1. Identificación de la zona de proyecto

La carretera “Tomatitas–Erquis Norte–Erquis Ceibal–Cr. Cadillac”, constituye parte de los caminos municipales más importantes para el desarrollo del turismo; esta ruta conecta una zona de alta productividad con el eje principal de las vías fundamentales como es la ruta F01 Tarija–La Paz.

#### 3.2. Descripción

Podemos describir los aspectos más relevantes del lugar como la vegetación nativa predominante donde se observa tres formaciones vegetales: bosque, matorral y vegetación herbácea; además, se incluye las áreas de cultivo. El clima de la zona es templado semiárido y varía muy poco en relación a las estaciones del año que correspondan, siendo su temperatura ambiente media igual a 19,12°C.

#### 3.3. Localización

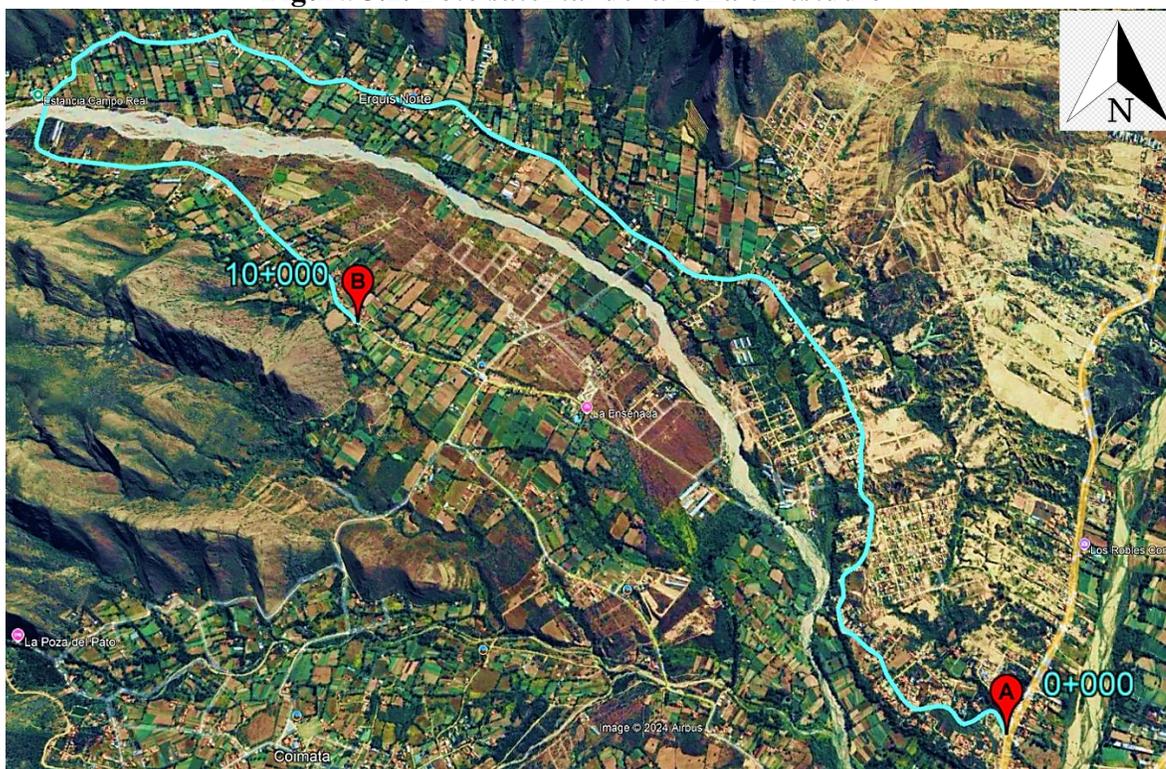
El tramo en estudio se encuentra ubicado en el departamento de Tarija, provincia Eustaquio Méndez, municipio de San Lorenzo, cantón Erquis.

**Figura 3.1. Localización geográfica de la zona en estudio**



Fuente: Mejorado de mapas del mundo.net

**Figura 3.2. Foto satelital de la zona en estudio**



**Fuente:** Google Earth Pro.

En la tabla 3.1. se muestran referencias precisas de los puntos de inicio y fin del tramo.

**Tabla 3.1. Ubicación de los puntos de inicio y fin del tramo de análisis**

Punto	Descripción	Progresiva [km]	Coordenadas		Altitud [msnm]
A	Centro de salud "Tomatitas"	0+000	<b>Coordenadas geográficas</b>		1965
			21°29'31,79" S	64°45'40,50" O	
			<b>Coordenadas UTM</b>		
			317541 m E	7622354 m S	
B	Final comunidad Erquis Norte	10+000	<b>Coordenadas geográficas</b>		2089
			21°28'44,10" S	64°47'44,39" O	
			<b>Coordenadas UTM</b>		
			313958 m E	7623780 m S	

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.4. Criterios del diseño metodológico

#### 3.4.1. Unidad de muestra

La unidad de muestra será “un sub tramo de pavimento a evaluar”, cuyas dimensiones son las recomendadas por cada metodología (PCI, IRI y Viga Benkelman) aplicada por el investigador, en dichos sub tramos se medirá el nivel de deterioro del pavimento.

#### 3.4.2. Población

La población finita estimada es de 584 sub tramos o unidades de muestra a lo largo del tramo de estudio.

#### 3.4.3. Muestra

Las metodologías aplicadas en la investigación tienen diferentes características entre sí, lo que denota heterogeneidad; ambos métodos son aplicables para determinar el nivel de deterioro del pavimento, por ello se los puede clasificar en grupos homogéneos y aplicar el muestreo estratificado con población finita.

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n N_i * \sigma^2}{N * \left(\frac{e}{Z}\right)^2 + \frac{\sum_{i=1}^n N_i * \sigma^2}{N}}$$

Se establece como nivel de confianza NC=95%, de acuerdo a ello la variable estandarizada es Z=1,96. Así mismo se adopta un margen de error e=0,05 y una varianza  $\sigma^2=0,10$  debido al corto tiempo asignado para la ejecución del trabajo.

$$n = \frac{58,40}{584 * \left(\frac{0,05}{1,96}\right)^2 + \frac{58,40}{584}} \rightarrow n \cong 122 \text{ subtramos}$$

**Tabla 3.2. Cálculo del tamaño de muestra**

Operación procedimental	Método	N <sub>i</sub>	σ <sup>2</sup>	N <sub>i</sub> *σ <sup>2</sup>	f <sub>i</sub>	n <sub>i</sub>
Evaluación superficial	PCI	334	0,10	33,40	0,57	70
	IRI	50	0,10	5,00	0,09	10
Evaluación estructural	Viga Benkelman	200	0,10	20,00	0,34	42
<b>Total de unidades de muestra N=</b>		<b>584</b>		<b>58,40</b>	<b>1</b>	<b>122</b>

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.3. Tamaño de muestra adoptado**

<b>Operación procedimental</b>	<b>Método</b>	<b>n<sub>i</sub></b>
Evaluación superficial	PCI	57
	IRI	26
Evaluación estructural	Viga Benkelman	50
<b>Total de unidades de muestra N=</b>		<b>133</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

Por lo tanto, el total de sub tramos por evaluar será de 133.

### **3.5. Levantamiento de información**

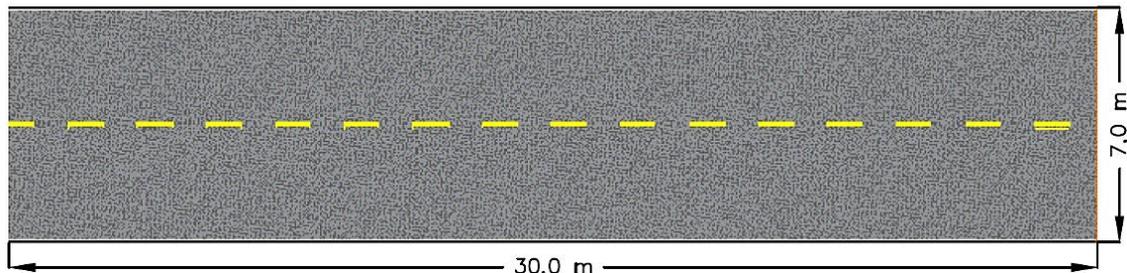
#### **3.5.1. Evaluación superficial del tramo**

Para la evaluación superficial del tramo Tomatitas–Erquis Norte, se aplicó la metodología PCI (Índice de Condición del Pavimento), siguiendo la norma ASTM D6433–03.

##### **3.5.1.1. Dimensión de las unidades de muestreo**

En función a las longitudes tomadas del ancho de calzada del pavimento en la carretera a Erquis que es de 7 m, se adoptó una longitud de 30 m para cada una de las unidades de muestreo.

**Figura 3.3. Esquema de la unidad de muestreo**



**Fuente:** Elaboración propia

De esta manera conseguimos una superficie de 210 m<sup>2</sup>, la misma se encuentra dentro de los rangos establecidos por la metodología aplicada.

### 3.5.1.2. Intervalo de muestreo

La ASTM D6433-03 recomienda que las unidades calculadas para la inspección estén igualmente espaciadas a lo largo de la sección de pavimento.

$$N = \frac{\text{Longitud del tramo}}{\text{Longitud de muestreo}} = \frac{10000\text{m}}{30\text{m}} = 333,33 \cong 334$$

$$i = \frac{N}{n} = \frac{334}{57} = 5,86 \cong 5$$

Donde:

N = Número total de unidades de muestreo en la sección del pavimento

n= Número de unidades de muestreo a evaluar (tamaño de muestra)

i= Intervalo de muestreo

### 3.5.1.3. Cálculo del PCI

Para el cálculo del PCI se siguió el siguiente procedimiento: Se midió la totalidad de fallas halladas en las diferentes unidades de muestra analizadas, estas fallas o daños fueron medidos en unidades de superficie [m<sup>2</sup>] o longitud [m] según su tipo. De igual manera se registró la severidad de cada falla, sea esta alta (H) media (M) o baja (L).

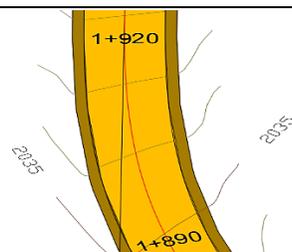
**Figura 3.4. Medición del área o longitud afectada según el tipo de falla**



Fuente: Elaboración propia.

La hoja de inspección usada en el proyecto, fue llenada con los principales datos de la unidad de muestra analizada como ser: las progresivas de inicio y fin, el área, fecha, unidad de muestra y un esquema de la misma.

**Tabla 3.4. Hoja de inspección de condiciones para la unidad U64**

MÉTODO PCI (ÍNDICE DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO)			
ZONA DE ESTUDIO: Tomatitas–Erquis Norte			
<b>Progresiva Inicio:</b>	1+890	<b>Esquema:</b> 	
<b>Progresiva Fin:</b>	1+920		
<b>Área (m²):</b>	210		
<b>Fecha:</b>	24/08/2023		
<b>Unidad de muestra:</b>	U64		
<b>Inspeccionado por:</b>	Gerardo Mauricio Vaca Valdez		
	<b>Falla</b>	<b>Unidad</b>	<b>Falla</b>
	1.-Piel de cocodrilo	m²	11.-Parcheo
	2.-Exudación	m²	12.-Agregado pulido
	3.-Fisuras en bloque	m²	13.-Huecos
	4.-Elevación–Hundimiento	m	14.-Acceso a puentes–Rejillas
	5.-Corrugaciones	m²	15.-Ahuellamiento
	6.-Depresiones	m²	16.-Deformación por empuje
	7.-Fisuras de borde	m	17.-Deslizamiento
	8.-Fisuras de reflexión de juntas	m	18.-Hinchamiento
	9.-Desnivel Carril–Berma	m	19.-Disgregación–Desintegración
	10.-Fisuras long. y transversales	m	

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.5.1.3.1. Densidad de los daños

Para la obtención de la densidad, se dividió cada uno de los daños en cada nivel de severidad entre el área de la unidad de muestreo en la que se trabajó, esta densidad se expresó en porcentaje, como ejemplo tenemos la unidad U64 (progresivas 1+890 a 1+920):

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Área total dañada (tipo y severidad)}}{\text{Área de la unidad de muestreo}} \times 100$$

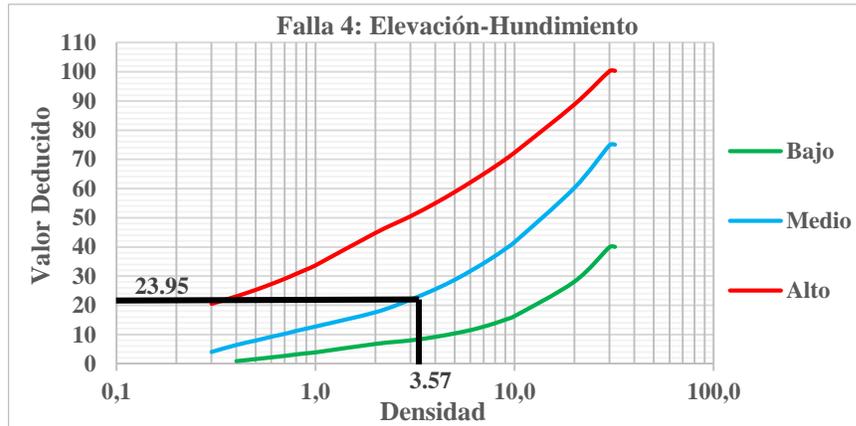
$$\text{Densidad} = \frac{7,50}{210} \times 100$$

$$\text{Densidad} = 3,57 \%$$

### 3.5.1.3.2. Valores deducidos

Para determinar el valor deducido (DV) según el tipo de falla y nivel de severidad, se utilizaron los ábacos de “valores deducidos” existentes para cada una de las fallas.

**Gráfico 3.1. Ábaco de valores deducidos Falla 4 U64**



**Fuente:** Vásquez Varela, L. R. (2002, febrero). Pavement condition index (PCI) para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras. Universidad Nacional de Colombia.

Para la mayor precisión se interpoló de la siguiente tabla:

**Tabla 3.5. Valores deducidos tabulados Elevación–Hundimiento**

Densidad	Valor Deducido		
	L	M	H
0,10	–	–	–
0,20	–	–	–
0,30	–	4,00	20,50
0,40	0,90	6,40	23,10
0,50	1,60	7,90	25,30
0,60	2,20	9,20	27,30
0,70	2,70	10,20	29,10
0,80	3,20	11,20	30,80
0,90	3,60	12,00	32,30
1,00	3,90	12,70	33,70
2,00	6,80	17,60	44,80
3,00	8,00	21,90	50,50
4,00	9,20	25,50	55,00
5,00	10,40	28,70	58,80
6,00	11,50	31,70	62,10
7,00	12,70	34,40	65,00
8,00	13,90	36,90	67,60
9,00	15,10	39,30	70,00
10,00	16,30	41,60	72,30
20,00	28,10	60,20	88,80
30,00	39,90	74,80	100,20
32,00	40,00	75,00	100,30
50,00	–	–	–
60,00	–	–	–
70,00	–	–	–
80,00	–	–	–
90,00	–	–	–
100,00	–	–	–

**Fuente:** Shahin, M. Y. (1994). Pavement management for airports, roads and parking lots.

En este caso se trató de la falla N°4 (Elevación–Hundimiento) de severidad media y una densidad de 3,57%; en función a estos parámetros se obtuvo el valor deducido de manera gráfica ingresando en el gráfico visto anteriormente o realizando un proceso de interpolación con ayuda de la tabla.

**Tabla 3.6. Resultados de densidades y valores deducidos**

Falla	Severidad	Total	Densidad (%)	Valor deducido
4.-Elevación–Hundimiento [m]	M	7,50	3,57	23,95
10.-Fisuras long. y transversales [m]	L	17,97	8,56	6,74
11.-Parcheo [m <sup>2</sup> ]	M	18,62	8,87	29,78
19.-Disgregación–Desintegración [m <sup>2</sup> ]	L	0,09	0,04	0,24

**Fuente:** Elaboración propia.

Una vez creada lista de valores deducidos individuales, se tabuló los datos en orden descendente. Para los datos de la tabla anterior el orden sería el siguiente: 29,78; 23,95; 6,74; 0,24.

Se determinó el número de deducciones permisibles, “*m*”, empleando la ecuación:

$$m = 1 + \left(\frac{9}{98}\right) * (100 - HDV)$$

Donde:

*m* = Número máximo admisible de valores deducidos incluyendo fracciones

HDV = El mayor valor deducido individual para la unidad de muestra

El número de valores deducidos individuales se redujo al máximo admisible de valores.

Si, contamos con un número de valores deducidos menor a “*m*”, se debe usar todos.

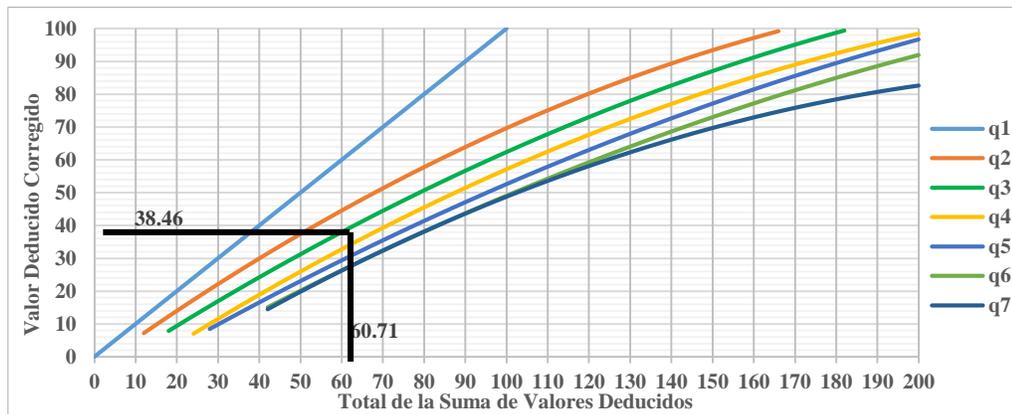
Para determinar “*q*” como el número de valores deducidos mayores a 2. Para el ejemplo realizado será *q*=3.

Luego se determinó el máximo valor deducido corregido (*CDV*), siguiendo los pasos:

Reducir a 2 el menor valor deducido individual mayor que 2 y repetir el procedimiento hasta que “*q*” sea igual a 1.

Para cada valor se determinó el valor deducido corregido mediante el siguiente gráfico.

**Gráfico 3.2. Ábaco de corrección de valores deducidos U64**



**Fuente:** Vásquez Varela, L. R. (2002, febrero). Pavement condition index (PCI) para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras. Universidad Nacional de Colombia.

**3.5.1.3.3. PCI de la unidad de muestra analizada**

De los valores deducidos corregidos escogimos el “máximo valor deducido corregido” para determinar el PCI, restando 100 al valor deducido corregido máximo obtenido.

**Tabla 3.7. Valores deducidos corregidos tabulados**

Total de valores deducidos	Valor deducido corregido VDC						
	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7
0,00	0,00						
10,00	10,00						
12,00	12,00	8,00					
18,00	18,00	12,50	8,00				
20,00	20,00	14,00	10,00				
25,00	25,00	18,00	13,50	8,00			
28,00	28,00	20,40	15,60	10,40	8,00		
30,00	30,00	22,00	17,00	12,00	10,00		
40,00	40,00	30,00	24,00	19,00	17,00		
42,00	42,00	31,40	25,40	20,40	18,20	15,00	15,00
50,00	50,00	37,00	31,00	26,00	23,00	20,00	20,00
60,00	60,00	44,00	38,00	33,00	29,00	26,00	26,00
70,00	70,00	51,00	44,50	39,00	35,00	32,00	32,00
80,00	80,00	58,00	50,50	45,00	41,00	38,00	38,00
90,00	90,00	64,00	57,00	51,00	46,00	44,00	44,00
100,00	100,00	71,00	63,00	57,00	52,00	49,00	49,00
110,00		76,00	68,00	62,00	57,00	54,00	54,00
120,00		81,00	73,00	68,00	62,00	59,00	59,00
130,00		86,00	78,50	73,00	67,00	63,00	63,00
135,00		88,50	81,50	75,50	69,50	65,00	65,00
140,00		91,00	84,00	78,00	72,00	68,00	67,00
150,00		94,00	88,00	82,00	76,00	72,00	70,00
160,00		98,00	93,00	86,00	81,00	76,00	74,00
166,00		100,00	94,80	88,40	83,40	79,00	75,20
170,00			96,00	90,00	85,00	81,00	76,00
180,00			99,00	93,00	88,00	84,00	79,00
182,00			100,00	93,60	88,60	84,80	79,60
190,00				96,00	91,00	88,00	82,00
200,00				98,00	94,00	90,00	84,00

**Fuente:** Shahin, M. Y. (1994). Pavement management for airports, roads and parking lots.

**Tabla 3.8. Valores deducidos corregidos VDC**

N°	Valor deducido				Total	q	VDC
	1	2	3	4			
1	29,78	23,95	6,74	0,24	60,71	3	38,46
2	29,78	23,95	2,00	0,24	55,97	2	41,18
3	29,78	2,00	2,00	0,24	34,02	1	34,02

Fuente: Elaboración propia

Finalmente se obtiene el PCI de la unidad restando de 100 el máximo valor deducido corregido de la anterior tabla.

Máximo valor deducido corregido	
VDC =	41,18

$$PCI = 100 - VDC$$

PCI =	58,82	Condición del pavimento	<b>BUENO</b>
-------	-------	-------------------------	--------------

Se realizó el mismo procedimiento para cada una de las unidades de muestra inspeccionadas en el tramo.

#### 3.5.1.4. Cálculo del PCI de unidades de muestra adicionales

Cuando se incluyen unidades de muestreo adicionales, el cálculo del (PCI) es ligeramente modificado para prevenir la extrapolación de las condiciones inusuales en toda la sección.

Lo que se hace en este caso es obtener un promedio ponderado de la siguiente forma:

$$PCI_S = \frac{[(N - A) * PCI_R] + (A * PCI_A)}{N}$$

Donde:

PCI<sub>S</sub>= PCI final de la sección del pavimento

PCI<sub>R</sub>= PCI promedio de las unidades de muestra aleatorias

PCI<sub>A</sub>= PCI promedio de las unidades de muestra adicionales

N= Número de unidades de muestra aleatorias inspeccionadas

A= Número de unidades de muestra adicionales inspeccionadas

### 3.5.1.4.1. Selección de unidades de muestra adicionales

Uno de los mayores inconvenientes del método aleatorio es la exclusión del proceso de inspección y evaluación de algunas unidades de muestreo en muy mal estado.

También puede suceder que unidades de muestreo que tienen daños que sólo se presentan una vez (por ejemplo, “cruce de línea férrea”) queden incluidas de forma inapropiada en un muestreo aleatorio.

Para evitar lo anterior, la inspección deberá establecer cualquier unidad de muestreo inusual e inspeccionarla como una “unidad adicional” en lugar de una “unidad representativa” o aleatoria.

Para la selección de unidades se recorrió el todo el tramo con el fin de preseleccionar aquellas donde se observaron una densidad importante de deterioros y no sean unidades ya evaluadas.

**Figura 3.5. Recorrido para la selección de unidades adicionales**



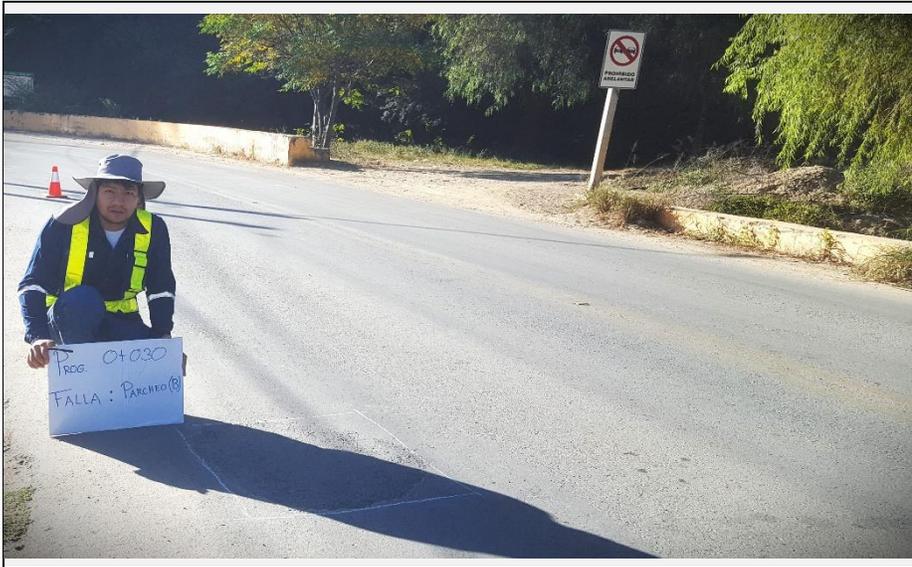
**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.5.1.4.2. Recolección de datos en campo

Para recopilar la información se inspeccionó la unidad de muestreo de acuerdo con el Manual de Daños, y se registró dicha información en el formato adoptado.

Como reporte fotográfico, se tienen los siguientes cuadros, los cuales cuentan con algunos datos como ser: la unidad de muestra, progresiva, fecha, y tipo de falla registrada.

**Figura 3.6. Parcheo**

	Unidad de muestra:
	UMA 1
	Progresivas:
	0+030-0+060
	Fecha:
	26/04/2024
	Tipo de falla:
Parcheo	
Observaciones:	
El parche presenta poco deterioro	

**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura 3.7. Hundimiento**

	Unidad de muestra:
	UMA 1
	Progresivas:
	0+030-0+060
	Fecha:
	26/04/2024
	Tipo de falla:
Hundimiento	
Observaciones:	
El hundimiento genera cierta incomodidad	

**Fuente:** Elaboración propia.

Si el hundimiento se produjo en el parche, también se registró, siguiendo los criterios de evaluación mencionados en la guía PCI.

**Figura 3.8. Fisura longitudinal**



**Fuente:** Elaboración propia.

Para las fisuras longitudinales y transversales se midió la longitud y el ancho para obtener la densidad y la severidad respectivamente. Concluida la evaluación se procedió a tabular los datos registrados de las fallas mensuradas en la unidad de muestra, como se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 3.9. Registro de daños presentes en UMA 1**

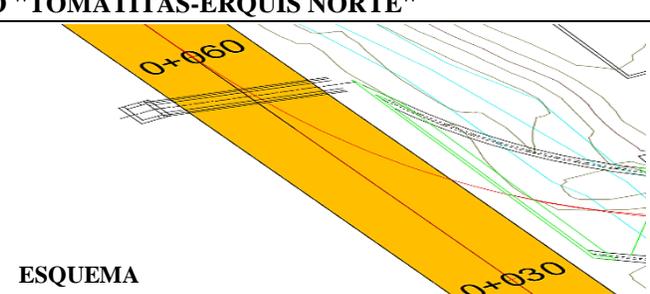
Daño	Severidad	Dimensiones		Cantidad parcial	Observaciones
		Largo	Ancho		
11	M	1,00	0,70	0,70	Moderadamente dañado
10	L	3,05		3,05	a=3mm<10mm
4	M	1,25		1,25	Genera incomodidad y obliga a disminuir la velocidad
4	M	1,90		1,90	Genera incomodidad y obliga a disminuir la velocidad
7	M	3,20		3,20	Presenta algo de fragmentación y desprendimiento
10	L	2,75		2,75	a=5mm<10mm
4	H	2,10		2,10	Produce una severa incomodidad

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.5.1.4.3. Trabajo de gabinete

Al completar la inspección de campo, la información sobre los daños fue utilizada para calcular el PCI, este cálculo puede realizarse mediante softwares, sin embargo, para este caso se realizó de manera manual generando una planilla Excel donde se puede apreciar cada paso realizado antes de obtener el PCI de la unidad de muestra.

**Tabla 3.10. Hoja de inspección de condiciones para la unidad UMA 1**

MÉTODO PCI (ÍNDICE DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO)			
ZONA DE ESTUDIO "TOMATITAS-ERQUIS NORTE"			
Progresiva inicio:	0+030		
Progresiva Fin:	0+060		
Área (m <sup>2</sup> ):	210		
Fecha:	26/04/2024		
Unidad de muestra:	UMA 1		
Inspeccionado por:	Univ. Gerardo Mauricio Vaca Valdez		
		ESQUEMA	
Falla	Unidad	Falla	Unidad
1.-Piel de cocodrilo	m <sup>2</sup>	11.-Parcheo	m <sup>2</sup>
2.-Exudación	m <sup>2</sup>	12.-Agregado pulido	m <sup>2</sup>
3.-Fisuras en bloque	m <sup>2</sup>	13.-Huecos	Nº
4.-Elevación-Hundimiento	m	14.-Acceso a puentes-Rejillas de drenaje	m <sup>2</sup>
5.-Corrugaciones	m <sup>2</sup>	15.-Ahuellamiento	m <sup>2</sup>
6.-Depresiones	m <sup>2</sup>	16.-Deformación por empuje	m <sup>2</sup>
7.-Fisuras de borde	m	17.-Deslizamiento	m <sup>2</sup>
8.-Fisuras de reflexión de juntas	m	18.-Hinchamiento	m <sup>2</sup>
9.-Desnivel Carril-Berma	m	19.-Disgregación-Desintegración	m <sup>2</sup>
10.-Fisuras long. y transversales	m		

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.5.1.4.3.1. Densidad de los daños

Se totalizó cada tipo y nivel de severidad de daño y se registró en la columna “Total”, el daño puede medirse en área, longitud o por número según el tipo de falla. Posteriormente se divide la cantidad de cada clase de daño y cada nivel de severidad, entre el área total de la unidad de muestreo (210 m<sup>2</sup>) y se expresa el resultado como porcentaje, esta es la densidad del daño, con el nivel de severidad especificado dentro de la unidad de estudio.

**Tabla 3.11. Densidad de los daños**

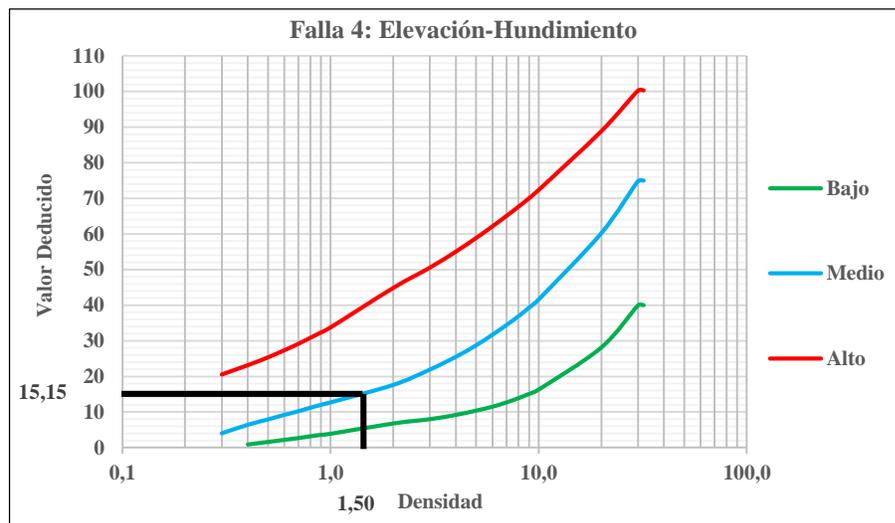
Tipo de Falla	Severidad	Total	Densidad
4.-Elevación-hundimiento (m)	M	3,15	1,50
4.-Elevación-hundimiento (m)	H	2,10	1,00
7.-Fisuras de borde (m)	M	3,20	1,52
10.-Fisuras long. y transversales (m)	L	5,80	2,76
11.-Parcheo (m <sup>2</sup> )	M	0,70	0,33

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.5.1.4.3.2. Valores deducidos

Una vez obtenidas las densidades, determinamos los valores deducidos mediante los ábacos o tablas según el tipo de daño y su nivel de severidad. Continuando con el ejemplo se muestra la obtención del valor deducido para la primera falla registrada en UMA 1.

**Gráfico 3.3. Ábaco de valores deducidos Falla 4 UMA 1**



**Fuente:** Vásquez Varela, L. R. (2002, febrero). Pavement condition index (PCI) para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras. Universidad Nacional de Colombia.

Similar operación se realizó para cada falla y severidad, ingresando a los ábacos con la densidad calculada como se muestra en la siguiente tabla.

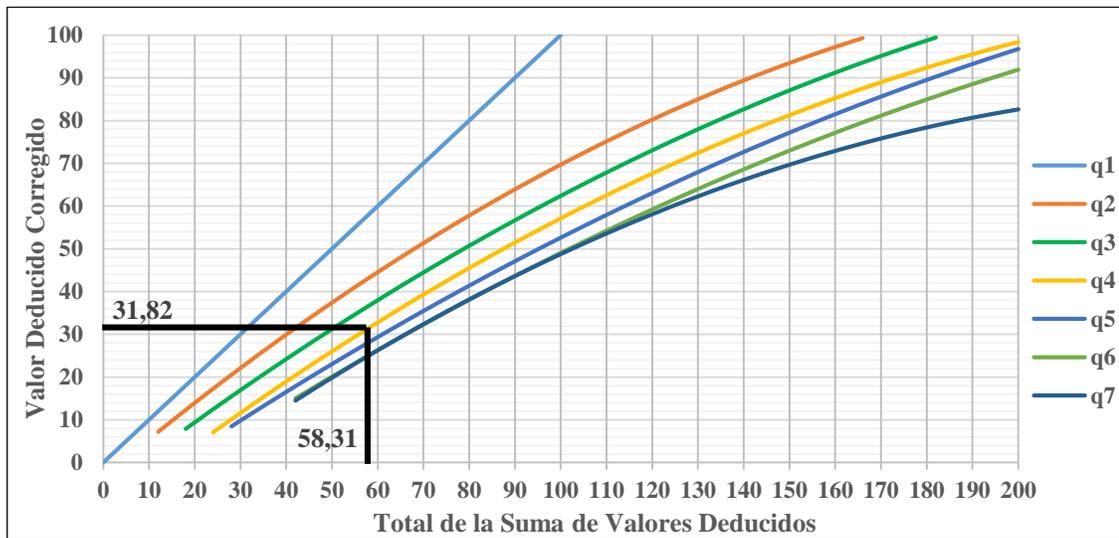
**Tabla 3.12. Valores deducidos**

Tipo de Falla	Severidad	Total	Densidad	Valor deducido
4.-Elevación-hundimiento (m)	M	3,15	1,50	15,15
4.-Elevación-hundimiento (m)	H	2,10	1,00	33,70
7.-Fisuras de borde (m)	M	3,20	1,52	2,48
10.-Fisuras long. y transversales (m)	L	5,80	2,76	1,54
11.-Parcheo (m <sup>2</sup> )	M	0,70	0,33	5,44

**Fuente:** Elaboración propia.

Se debe reducir a 2 el menor valor deducido individual siempre y cuando sea mayor a 2 y repetir el procedimiento hasta que “q” sea igual a 1, luego obtener el total de cada valor deducido individual y con este valor se entra en el gráfico mostrado a continuación.

**Gráfico 3.4. Ábaco de corrección de valores deducidos UMA 1**



**Fuente:** Vásquez Varela, L. R. (2002, febrero). Pavement condition index (PCI) para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras. Universidad Nacional de Colombia.

**Tabla 3.13. Valores deducidos corregidos**

N°	Valores deducidos					Total	q	VDC
	1	2	3	4	5			
1	33,70	15,15	5,44	2,48	1,54	58,31	4	31,82
2	33,70	15,15	5,44	2,00	1,54	57,83	3	36,48
3	33,70	15,15	2,00	2,00	1,54	54,39	2	40,07
4	33,70	2,00	2,00	2,00	1,54	41,24	1	41,24

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.5.1.4.3.3. PCI de la unidad de muestra adicional analizada

De los valores deducidos corregidos escogimos el “máximo valor deducido corregido” para determinar el PCI, restando 100 al valor deducido corregido máximo obtenido; como se muestra a continuación.

Máximo valor deducido corregido	
VDC =	41,24

$$\text{PCI} = 100 - \text{VDC}$$

PCI =	58,76	Condición del pavimento	<b>BUENO</b>
-------	-------	-------------------------	--------------

Similar proceso se hizo para cada unidad de muestra adicional inspeccionada en el tramo.

### 3.5.1.5. Resultados del PCI

Se presenta una tabla resumen de los resultados de la evaluación superficial del tramo de estudio, la metodología cuenta con clasificación cuantitativa y cualitativa del estado del pavimento.

**Tabla 3.14. Resultados de la evaluación superficial**

<b>Progresiva Inicio</b>	<b>Progresiva Fin</b>	<b>PCI</b>	<b>Clasificación</b>
0+000	0+030	51,32	REGULAR
0+030	0+060	58,79	BUENO
0+060	0+090	75,52	MUY BUENO
0+090	0+120	59,70	BUENO
0+120	0+150	69,00	BUENO
0+150	0+180	68,80	BUENO
0+180	0+210	64,42	BUENO
0+210	0+240	63,18	BUENO
0+270	0+300	84,32	MUY BUENO
0+540	0+570	94,72	EXCELENTE
0+810	0+840	92,51	EXCELENTE
1+080	1+110	88,74	EXCELENTE
1+350	1+380	86,57	EXCELENTE
1+620	1+650	79,94	MUY BUENO
1+662,53	1+692,53	66,96	BUENO
1+890	1+920	58,82	BUENO
2+160	2+190	67,00	BUENO
2+430	2+460	66,90	BUENO
2+700	2+730	78,28	MUY BUENO
2+970	3+000	99,59	EXCELENTE
3+177,68	3+207,68	54,59	REGULAR
3+240	3+270	81,37	MUY BUENO
3+510	3+540	85,46	MUY BUENO
3+687,44	3+717,44	34,75	MALO
3+780	3+810	79,15	MUY BUENO
4+000	4+030	60,30	BUENO
4+270	4+300	85,59	MUY BUENO
4+540	4+570	86,56	EXCELENTE
4+610,35	4+640,35	57,71	BUENO
4+810	4+840	85,46	MUY BUENO
5+080	5+110	72,26	MUY BUENO
5+350	5+380	76,84	MUY BUENO
5+514,50	5+544,50	69,83	BUENO
5+620	5+650	100	EXCELENTE
5+890	5+920	91,47	EXCELENTE
6+160	6+190	99,77	EXCELENTE
6+219	6+249	73,54	MUY BUENO
6+430	6+460	74,94	MUY BUENO
6+700	6+730	92,69	EXCELENTE
6+970	7+000	84,08	MUY BUENO
7+240	7+270	85,24	MUY BUENO
7+510	7+540	96,37	EXCELENTE

7+780	7+810	85,46	MUY BUENO
8+000	8+030	85,92	MUY BUENO
8+150	8+180	100	EXCELENTE
8+300	8+330	85,04	MUY BUENO
8+450	8+480	85,46	MUY BUENO
8+600	8+630	77,45	MUY BUENO
8+750	8+780	89,12	EXCELENTE
8+900	8+930	89,46	EXCELENTE
9+050	9+080	86,30	EXCELENTE
9+200	9+230	83,46	MUY BUENO
9+350	9+380	82,05	MUY BUENO
9+500	9+530	89,73	EXCELENTE
9+650	9+680	83,14	MUY BUENO
9+800	9+830	84,39	MUY BUENO
9+950	9+980	83,74	MUY BUENO

**Fuente:** Elaboración propia.

Como se indicó al iniciar el cálculo para las unidades de muestra adicionales, el resultado final de proyecto se realiza mediante el PCI ponderado del área de las unidades de muestra evaluadas inicialmente y las unidades de muestra inspeccionadas adicionalmente.

$$PCI_S = \frac{[(N - A) * PCI_R] + (A * PCI_A)}{N}$$

$$PCI_S = \frac{[(44 - 13) * 83] + (13 * 62,81)}{44}$$

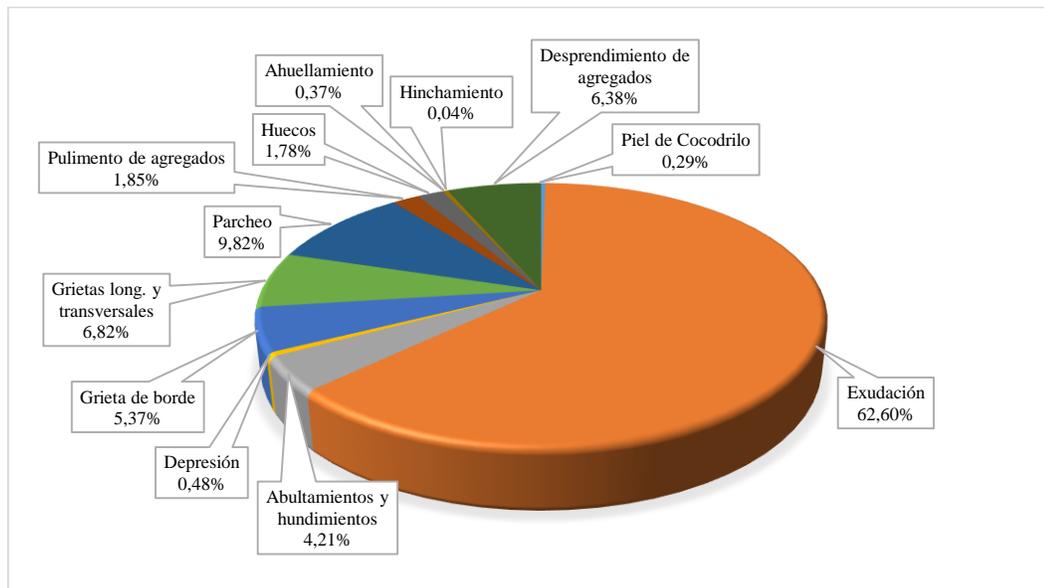
$$PCI_S = 77,03$$

PCI	Clasificación
77	MUY BUENO

El promedio de los PCI calculados fue 77, por lo tanto, según la ASTM D6433-03 se puede establecer que el tramo evaluado se encuentra en muy buen estado, por ende, se deberá programar intervenciones de tipo rutinario para mantener la integridad del pavimento antes que este entre a un punto de quiebre produciendo fallas considerables no solo superficiales sino también estructurales como pudimos observar de manera gráfica en la curva de deterioro de los pavimentos.

En el siguiente gráfico se muestran las fallas y su porcentaje correspondiente presentes en el tramo de análisis.

**Gráfico 3.5. Porcentaje de fallas**



**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.5.2. Aplicación de la metodología IRI

Para evaluar el tramo de análisis mediante el método IRI, se siguieron los lineamientos de la norma ASTM E-950.

#### 3.5.2.1. Intervalo de muestreo

La longitud de muestra para el rugosímetro de Merlín es de 400 m y se debe realizar de manera intercalada en ambos carriles a lo largo del tramo.

$$N = \frac{\text{Longitud del tramo}}{\text{Longitud de muestreo}} = \frac{10000 * 2}{400} = 50$$

$$i = \frac{N}{n} = \frac{50}{26} = 1,92 \cong 1$$

Donde:

N = Número total de unidades de muestreo en la sección del pavimento

n= Número de unidades de muestreo a evaluar (tamaño de muestra)

i= Intervalo de muestreo

### 3.5.2.2. Obtención de datos de campo con el Rugosímetro de Merlín

Para la ejecución de los ensayos se requirieron de tres personas que trabajaron conjuntamente, un operador que condujo el equipo y fue dictando las lecturas, un auxiliar que registraba las mismas y un ayudante que iba por la parte trasera moviendo los conos de seguridad a medida que los dos primeros avanzaban.

**Figura 3.9. Calibración del equipo Merlín**



**Fuente:** Elaboración propia.

Las lecturas se realizaron tomando como referencia la circunferencia de la rueda del Merlín, que tiene aproximadamente un perímetro de 2 m, es decir, cada ensayo se realiza estacionando el equipo al cabo de una vuelta completa de la rueda, se toma la lectura marcada en el tablero del equipo e inmediatamente se avanza los siguientes 2 m hasta completar la planilla con las 200 lecturas requeridas para generar el histograma.

**Figura 3.10. Toma de datos con el Rugosímetro de Merlín**



**Fuente:** Elaboración propia.

Como ejemplo se tomó una de las secciones del carril de ida, la misma se encuentra entre las progresivas 1+600 a 2+000.

**Tabla 3.15. Datos de campo con la Rueda de Merlín**

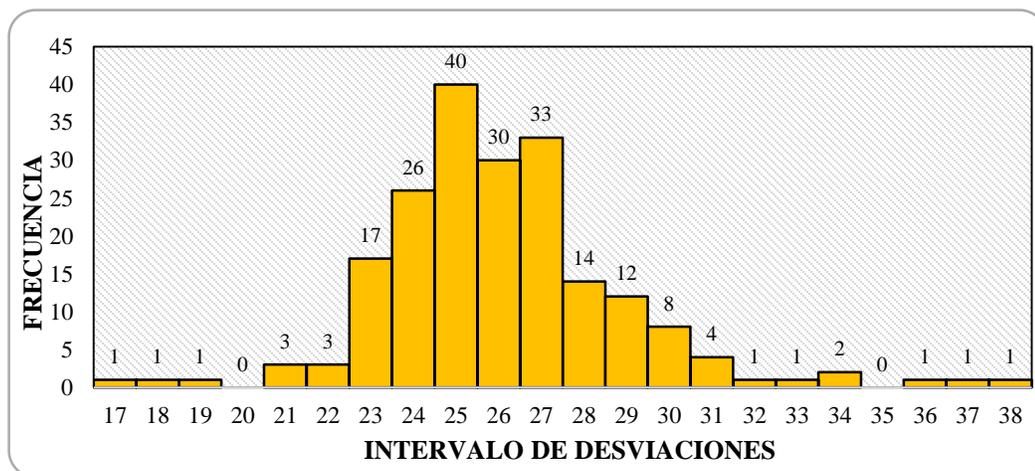
LECTURAS DE CAMPO										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	25	23	25	24	25	24	26	25	25	25
2	25	28	27	25	25	25	24	22	25	23
3	24	24	27	24	24	25	27	27	23	23
4	24	25	25	25	24	26	29	25	25	26
5	24	24	25	26	25	28	27	27	26	28
6	28	27	24	31	28	25	25	26	29	29
7	26	25	28	23	26	27	27	23	25	26
8	29	27	30	23	27	32	26	26	27	23
9	29	27	22	30	29	38	27	30	29	25
10	25	27	27	30	24	30	27	29	24	28
11	27	28	27	25	25	27	25	29	27	26
12	26	29	25	26	23	34	28	31	26	37
13	17	36	27	34	24	26	26	26	33	29
14	27	31	29	31	24	28	23	24	28	30
15	21	27	23	28	26	26	21	26	27	24
16	25	24	26	27	23	25	27	30	24	25
17	27	27	19	26	27	26	23	25	27	27
18	28	26	26	24	28	24	26	30	24	23
19	25	24	25	24	23	24	23	25	25	25
20	22	26	27	21	26	18	25	26	25	23

Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.2.3. Procedimiento de cálculo

Con los datos letrados en campo se determinó un histograma de frecuencias, donde se refleja el número de veces que se repite el valor numérico una determinada lectura.

**Gráfico 3.6. Histograma de las lecturas de campo**



Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.2.3.1. Factor por corrección

$$F. C. = \frac{(EP \times 10)}{(LI - LF) \times 5}$$

Donde:

EP = Espesor de la pastilla = 6

LI = Posición inicial del puntero = 25

LF = Posición final del puntero = 15

$$F. C. = \frac{(6 \times 10)}{(25 - 15) \times 5}$$

$$F. C. = 1,20$$

### 3.5.2.3.2. Rango “D”

Del histograma mostrado en el siguiente gráfico depuramos el 10% de los datos, 5% por cada extremo del histograma. Para ello realizamos la siguiente tabla de frecuencias.

**Tabla 3.16. Frecuencias**

Valor a dividir izq. ( $d_i$ )	17
Existente izq. ( $e_i$ )	9
Faltante izq. ( $f_i$ )	1
Valor a dividir der. ( $d_d$ )	4
Existente der. ( $e_d$ )	7
Faltante der. ( $f_d$ )	3
Rango medio ( $d_m$ )	7

**Fuente:** Elaboración propia.

Con estos datos se procedió a realizar el cálculo respectivo:

$$D = \left( \frac{(d_i - f_i)}{d_i} + d_m + \frac{(d_d - f_d)}{d_d} \right) * 5 \text{ [mm]}$$

$$D = \left( \frac{(17 - 1)}{17} + 7 + \frac{(4 - 3)}{4} \right) * 5 \text{ [mm]}$$

$$D = 40,96 \text{ mm}$$

### 3.5.2.3.3. Corrección del rango “D”

$$D_c = D * F. C.$$

$$D_c = 40,96 * 1,20$$

$$D_c = 49,15\text{mm}$$

### 3.5.2.3.4. Determinación del IRI para la progresiva 1+600 a 2+000

Cuando  $IRI < 2,4$       $IRI = 0,0485 * D_c$

Cuando  $2,4 < IRI < 15,9$       $IRI = 0,593 + 0,0471 * D_c$

$$IRI = 0,593 + 0,0471 * 49,15$$

$$IRI = 2,91 \text{ m/Km}$$

Se realizó el mismo procedimiento para cada uno de los tramos evaluados, dicho procedimiento se encuentra al final del documento.

### 3.5.2.4. Resultados y clasificación final del IRI

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos en la evaluación de ida y vuelta y el promedio respectivamente.

**Tabla 3.17. Resultados y clasificación IRI**

Progresivas [Km]	Carril		IRI [m/Km]	Clasificación
	Izquierdo	Derecho		
0+000		X	3,19	Bueno
0+400	X		3,41	Bueno
0+800		X	3,42	Bueno
1+200	X		2,64	Bueno
1+600		X	2,91	Bueno
2+000	X		2,77	Bueno
2+400		X	2,59	Bueno
2+800	X		2,17	Bueno
3+200		X	2,16	Bueno
3+600	X		2,19	Bueno
4+000		X	2,24	Bueno
4+400	X		2,50	Bueno
4+800		X	2,42	Bueno
5+200	X		2,18	Bueno
5+600		X	2,89	Bueno
6+000	X		2,05	Bueno
6+400		X	2,27	Bueno
6+800	X		2,22	Bueno

7+200		X	2,87	Bueno
7+600	X		2,71	Bueno
8+000		X	1,92	Muy bueno
8+400	X		2,95	Bueno
8+800		X	2,32	Bueno
9+200	X		2,09	Bueno
9+600		X	2,37	Bueno
10+000	X		2,14	Bueno

**Fuente:** Elaboración propia.

Por último, se procedió a calcular el IRI característico del tramo de análisis.

$$IRI_c = IRI_p + t * \sigma$$

$$IRI_c = 2,52 + 1,645 * 0,42$$

IRI <sub>c</sub> (m/km)	Clasificación
3,22	BUENO

Se tiene un IRI final de **3,22 m/Km**, y según la clasificación de la metodología, la sección de pavimento evaluada se encuentra en buen estado.

### 3.5.3. Evaluación estructural del tramo

Para la evaluación estructural del tramo, se aplicó el método de la Viga Benkelman, siguiendo la norma ASTM D4695-03.

#### 3.5.3.1. Dimensión de las unidades de muestreo

El método estándar de pruebas para la medición de deflexiones en pavimentos Aashto T 256-01 recomienda que la frecuencia de medición debe ser entre 50 y 200 m, para así obtener resultados confiables.

#### 3.5.3.2. Intervalo de muestreo

Para la investigación se adoptó una frecuencia entre mediciones de 50 m.

$$N = \frac{\text{Longitud del tramo}}{\text{Longitud de muestreo}} = \frac{10000 \text{ m}}{50 \text{ m}} = 200$$

$$i = \frac{N}{n} = \frac{200}{50} = 4$$

Donde:

N = Número total de unidades de muestreo en la sección del pavimento

n= Número de unidades de muestreo a evaluar (tamaño de muestra)

i= Intervalo de muestreo

### 3.5.3.3. Procedimiento para la toma de datos

Se alquiló una volqueta con capacidad de 8m<sup>3</sup>, con eje trasero simple de llantas duales, previo al inicio del ensayo se comunicó al chofer que realice la medición de la presión de inflado de las llantas de tal forma que registre 80 psi, posteriormente nos dirigimos a una chancadora de áridos en la comunidad de Santa Ana para comprar el material (gravilla) y poder cumplir con el peso requerido, a continuación se realizó el respectivo pesaje de la volqueta logrando el peso exacto de 8200 kg en el eje trasero.

**Figura 3.11. Cargado para el posterior pesaje de volqueta**



		<b>BALANZA "MENDOZA"</b>		N° 975	
		KM. 7.5 CARRETERA AL CHACO		Ingreso: 6/9/2023 8:10:53 AM	
		CEL. 70218371 - 75128566		Salida:	
		Tarija - Bolivia			
BRUTO: 8.200	TARA: 0	NETO: 0	QQ.: 0,00		
Vendedor: s/n s/n					
Comprador: GERARDO M. VACA VALDEZ					
Chofer: IMAR RUIZ					
Placa: 1120 SRY VOLVO VERDE					
Tipo Vehiculo: VOLQUETA					
Material: GRAVILLA					
Monto Bs.: 30					
Observacion:					
 ENCARGADO BALANZA JALDIN MELVA				 CLIENTE Gerardo Mauricio Vaca Valdez	

**Fuente:** Elaboración propia.

Una vez localizados los sitios a ser evaluadas, se marcaron las distancias de cada lectura a realizar en cada punto de ensayo, adoptando el siguiente formato: a 50, 100, 150, 200 y 500 cm, cabe mencionar que se debe coordinar lo mejor posible con el chofer para que pueda frenar el vehículo exactamente en la señal previamente marcada.

**Figura 3.12. Marcado de distancias para sus respectivas lecturas**



**Fuente:** Elaboración propia.

Posteriormente se procedió a ensamblar la viga ya que se tiene un brazo desplegable de dos módulos los cuales van ensamblados con tornillos de ajuste, se niveló el apoyo principal con una manivela para lograr que el puntero del brazo de la viga este en contacto mínimo con la superficie asfáltica, un extremo de la viga se colocó en medio de una de las ruedas duales de manera que este coincida con el eje del diferencial trasero de la volqueta.

**Figura 3.13. Colocación del equipo, registro de deflecciones y temperaturas**



**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.5.3.4. Procedimiento de cálculo de la deflexión del pavimento

Con los datos registrados calculamos las deflexiones y los radios de curvatura. A continuación, se muestra el procedimiento para el cálculo de los mismos. Como ejemplo se tomó la lectura de la progresiva 0+800.

<b>Tramo:</b> Tomatitas–Erquis Norte									
<b>Carril:</b> Derecho					Fecha: 06/09/2023				
Progresiva	<b>LECTURAS DEL DIAL Prog.: 0+800</b>								
	L 0 cm	L 50 cm	L 100 cm	L 150 cm	L 200 cm	L 500 cm	T° Asfalto	T° Ambiente	Altura de la carpeta
0+800	0	2	2	2	4	6	32	13	5

#### 3.5.3.4.1. Deflexión máxima (Prog. 0+800)

$$D_0 = K * (L_f - L_0)$$

$$D_0 = 2 * (6 - 0)$$

$$D_0 = 12 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

#### 3.5.3.4.2. Factor de corrección por temperatura

EL valor de deflexión máxima obtenido debe corregirse por temperatura ya que las medidas deben llevarse a una temperatura estándar de 20°C, para poder realizar comparaciones entre diferentes tramos la medición de temperatura del pavimento para el punto de ensayo descrito fue de 32°C, el valor de deflexión máxima debe corregirse usando la siguiente expresión:

$$F_T = \frac{1}{k * (t - 20^\circ\text{C}) * e + 1}$$

$$F_T = \frac{1}{0,0008 * (32 - 20^\circ\text{C}) * 5 + 1}$$

$$F_T = 0,95$$

#### 3.5.3.4.3. Factor de corrección por estacionalidad

La capacidad de deformación de los suelos está influenciada por el grado de saturación experimentada, por lo tanto, es deseable que la medición de deflexiones se realice durante la estación de lluvias, en la cual los suelos se encuentran en la situación más crítica.

Debido a que el ensayo se realizó en época seca se debe efectuar la corrección de las medidas a fin de tomar en cuenta dicho aspecto. Para el caso del tramo Tomatitas–Erquis Norte, los resultados de laboratorio realizados previa construcción de la carretera determinan un equilibrio de suelos finos y gruesos, con predominio de los gruesos. Dicho esto, se adoptó un factor de corrección por estacionalidad  $F_E=1,30$

#### **3.5.3.4.4. Deflexión máxima corregida (Prog. 0+800)**

$$D_0' = D_0 * F_T * F_E$$
$$D_0' = 12 * 0,95 * 1,30$$
$$D_0' = 14,89 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

#### **3.5.3.4.5. Deflexión a 50 cm (Prog. 0+800)**

El procedimiento de cálculo para determinar la deflexión a la distancia de 50 cm se procede de la misma manera que la deflexión máxima.

$$D_{50} = K * (L_f - L_{50})$$
$$D_{50} = 2 * (6 - 2)$$
$$D_{50} = 8 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

#### **3.5.3.4.6. Deflexión corregida a 50 cm (Prog. 0+800)**

Se debe tener en cuenta que el valor de los factores de corrección por temperatura y estacionalidad se mantienen constantes.

$$D_{50}' = D_{50} * F_T * F_E$$
$$D_{50}' = 8 * 0,95 * 1,30$$
$$\mathbf{D_{50}' = 9,92 \times 10^{-2} \text{ mm}}$$

#### **3.5.3.4.7. Deflexión admisible**

Para la determinación de los ESAL's se tomaron las mismas consideraciones del estudio original “Construcción camino Tomatitas–Erquis Norte–Erquis Ceibal–Cr. Cadillac”.

Se hace notar que en el estudio original se ha tomado un factor de distribución direccional igual a 0,50 (50%) que representa el mismo número de vehículos circulando en ambas direcciones y un factor de distribución por carril de 1 que representa el número de carriles en una dirección.

$$D_{adm} = 26,32202 * ESAL'S^{(-0,2438)}$$

$$D_{adm} = 26,32202 * 960776^{(-0,2438)}$$

$$D_{adm} = 92 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

### 3.5.3.4.8. Deflexión característica

$$D_c = D_m + t * \sigma$$

$$D_c = 13,75 + 1,645 * 4,37$$

$$D_c = 20,95 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

### 3.5.3.4.9. Radio de curvatura

La curvatura que experimenta la superficie del pavimento, durante la aplicación de la carga, es de forma parabólica, en un segmento de aproximadamente 25 cm, a partir de la deflexión máxima. El radio de curvatura se ha establecido con la siguiente expresión:

$$RC' = \frac{10 * (25^2)}{K * (D_0' - D_{50}')}$$

$$RC' = \frac{6250}{2 * (14,89 - 9,92)}$$

$$RC' = 629,81 \text{ m}$$

### 3.5.3.4.10. Resultados de la Viga Benkelman

Se realizó un análisis por cada kilómetro de tramo evaluado

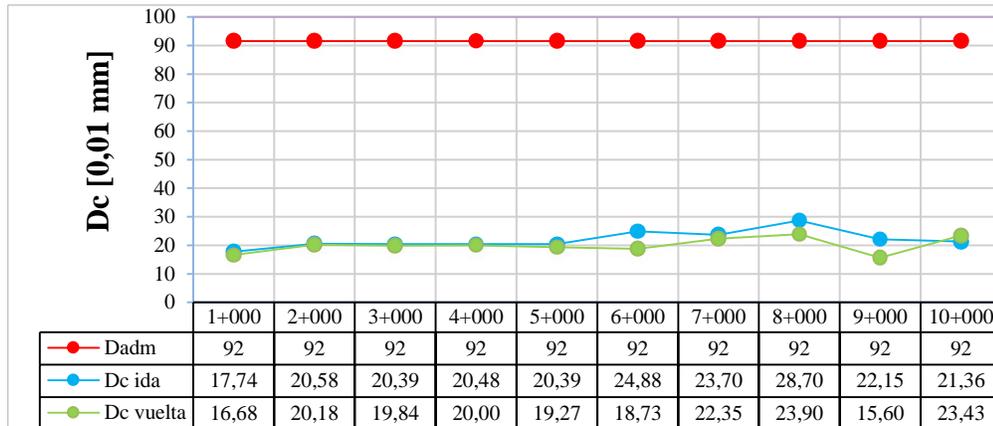
**Tabla 3.18. Resultados de la evaluación estructural por kilómetro**

Progresiva inicial	Progresiva final	Dc (0,01 mm)		RC (m)	
		Ida	Vuelta	Ida	Vuelta
0+000	1+000	17,74	16,68	626,44	654,81
1+000	2+000	20,58	20,18	569,23	583,41
2+000	3+000	20,39	19,84	574,28	653,85
3+000	4+000	20,48	20,00	571,88	588,70
4+000	5+000	20,39	19,27	638,94	584,13
5+000	6+000	24,88	18,73	509,62	580,77
6+000	7+000	23,70	22,35	576,68	576,44
7+000	8+000	28,70	23,90	641,83	508,89
8+000	9+000	22,15	15,60	580,53	632,69
9+000	10+000	21,36	23,43	590,38	557,93

**Fuente:** Elaboración propia.

A continuación, se presenta un gráfico de las deflexiones presentadas anteriormente, se observa que las deflexiones del carril de ida con mayores al carril de vuelta esto se debe posiblemente a la pendiente que presenta la rasante, haciendo que la mayor parte del peso se concentre en el eje trasero del vehículo.

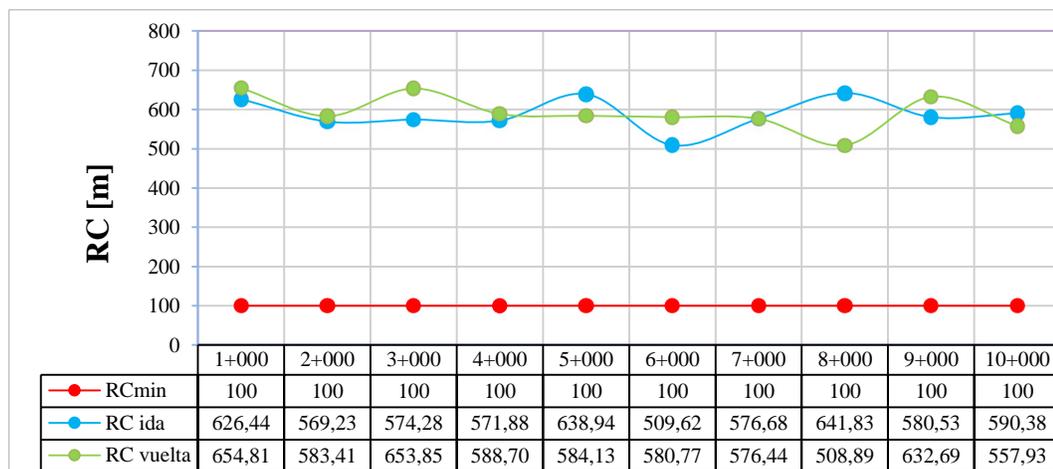
**Gráfico 3.7. Deflectograma**



**Fuente:** Elaboración propia.

De igual manera podemos apreciar que las deflexiones calculadas tanto de ida como de vuelta, se encuentran muy por debajo de la deflexión admisible, por lo tanto, se puede interpretar que la subrasante cuenta con una buena recuperación ante las solicitaciones.

**Gráfico 3.8. Radios de curvatura**



**Fuente:** Elaboración propia.

En el gráfico podemos ver que los radios de curvatura calculados tanto de ida como de vuelta, se hallan por encima del radio de curvatura mínimo establecido, lo que ratifica que no solo la subrasante se comporta de manera adecuada sino también la capa de rodadura.

### 3.6. Planificación y programación del mantenimiento vial

#### 3.6.1. Aplicación del software HDM-4 en el tramo de estudio

Una vez conocida la condición actual de la vía, aplicando el programa computacional **HDM-4**, se pudo efectuar un análisis adecuado del deterioro y evolución del mismo en el tiempo. Con toda la información recabada se realizó la planificación de los trabajos que se deberán ejecutar en materia de mantenimiento vial y así el pavimento del tramo Tomatitas–Erquis Norte tenga condiciones óptimas durante un periodo de análisis de 15 años.

#### 3.6.2. Base de datos para la aplicación del programa HDM-4

Todo administrador de redes viales que cuente con una organización y recursos razonablemente apropiados, debiera poder recolectar periódicamente los datos de campo necesarios para mantener actualizadas las bases de datos del sistema. Gran parte de los datos requeridos son aquellos que fueron necesarios para efectuar el diseño geométrico de la vía, y el de espesores de la estructura del pavimento, así mismo fue fundamental evaluar las condiciones actuales de la carretera.

**Tabla 3.19. Características del tramo**

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Longitud	10	[km]
Ancho de calzada	7	[m]
N° de carriles	2	
Ancho de berma	1	[m]
Espesor subbase	24	[cm]
Espesor base	15	[cm]
Espesor bituminoso	5	[cm]
IRI	3,22	[m/km]
PCI	77	
Altitud	2047	[msnm]
Precipitación media	67	[mm]
Temperatura media	19,10	[°C]

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.6.3. Estándares de mantenimiento

En HDM-4 los estándares de mantenimiento definen los trabajos requeridos para mantener la vía en el nivel de serviciabilidad deseado. A continuación, se muestran los estándares y sus respectivos trabajos aplicados al caso:

1. Mantenimiento rutinario
  - Sellado de grietas
  - Bacheo superficial
2. Mantenimiento periódico
  - Sello asfáltico
3. Rehabilitación
  - Capa asfáltica de refuerzo

### 3.6.4. Criterios de intervención

El criterio de intervención depende mucho de la entidad encargada del mantenimiento de carreteras, para el modelamiento del proyecto se tomó en cuenta los siguientes criterios:

**Tabla 3.20. Criterios de intervención adoptados**

Estándares	Código	Trabajos	Criterio de intervención	Efectos
Mantenimiento rutinario	MR	Sellado de grietas	Fisuración estructural ancha $\geq 1\%$ Programado anualmente	50% de fisuras selladas
		Bacheo superficial	Área con baches $\geq 1 \text{ N}^\circ/\text{km}$ Programado anualmente	50% de baches parchados
Mantenimiento periódico	MP	Sello asfáltico	$10\% \leq \text{Área total de calzada fisurada} \leq 15\%$	100% de deterioros "superficiales" corregidos
Rehabilitación	RH	Sobrecarpeta	$\text{IRI} \geq 5 \text{ m/km}$ y Área dañada total $\geq 15\%$	$\text{IRI}=2 \text{ m/km}$

**Fuente:** Elaboración propia.

El cuadro anteriormente visto, fue elaborado tomando en cuenta la lógica de intervención de mantenimientos pasados vistos en diferentes bibliografías, de igual manera fueron adoptados como valores recomendados por el mismo software.

Se realizó una combinación de los 3 estándares mostrados anteriormente, ya que sería lo ideal programar primeramente trabajos de rutina cada año, posteriormente realizar intervenciones ocasionalmente o con una mayor periodicidad como son los

mantenimientos periódicos, y por último cuando la vía tenga un deterioro significativo gatillar la rehabilitación. Los estándares combinados propuestos son los siguientes:

- M. rutinario
- M. rutinario & M. periódico
- M. rutinario & M. periódico + Rehabilitación

### **3.6.5. Informe de resultados**

Los informes que se presentan a continuación, son los resultados generados por el software, según los estándares de trabajo, criterios, umbrales y efectos deseados para la presente aplicación.

### **3.6.6. Estado anual de la carretera**

Nos genera resultados de la evolución de los deterioros analizados por el programa, de igual manera los efectos del trabajo realizado en cuanto a mantenimiento.

**Tabla 3.21. Estado anual de la carretera**

# H D M - 4

## Estado anual de la carretera (rodadura bituminosa)

HIGHWAY DEVELOPMENT & MANAGEMENT

Nombre del estudio:

Fecha de ejecución: **23-07-2024**

**Detalles tramo:**

ID: Descripción: Tomatitas-Erquis Norte

Clase de carretera: Terciaria o local

Longitud: 10.00km Ancho: 7.00m

**Alternativa: M. rutinario**

Año	TM IMD	ESAL (millones/carril) YE4		Tipo de firme	Número Estructural medio SNPK	Regularidad IRI (m/km) RI	Área Fisurada (%)			Área Peladuras (%) ARV	Baches		Área de rotura de borde (m²/km) AEB	Rodera	Textura (mm) TD	Resistencia al deslizamiento SFC50
							Total estructural ACA	Ancha estructural ACW	Fisuración total ACRA		Número por km NPT	Área (%) APOT		Profundidad media de la rodera (mm) RDM		
2024	863	0,07	Antes trabajos	AMGB	3,79	3,22	1,98	1,23	1,98	8,52	5	0,01	6,24	8,41	0,50	0,40
			Después trabajos	AMGB	3,79	3,25	1,37	0,62	1,37	8,52	2	0,00	6,24	8,41	0,50	0,40
2025	923	0,07	Antes trabajos	AMGB	3,79	3,32	2,96	1,55	2,96	16,75	3	0,00	7,09	8,62	0,50	0,40
			Después trabajos	AMGB	3,79	3,32	2,18	0,78	2,18	16,75	1	0,00	7,09	8,62	0,50	0,40
2026	988	0,08	Antes trabajos	AMGB	3,78	3,44	4,12	2,11	4,12	29,61	2	0,00	8,07	8,83	0,50	0,40
			Después trabajos	AMGB	3,78	3,43	3,06	1,06	3,06	29,61	1	0,00	8,07	8,83	0,50	0,40
2027	1057	0,08	Antes trabajos	AMGB	3,78	3,55	5,30	2,75	5,30	48,59	1	0,00	9,18	9,04	0,50	0,40
			Después trabajos	AMGB	3,78	3,54	3,92	1,38	3,92	48,59	1	0,00	9,18	9,04	0,50	0,40
2028	1131	0,09	Antes trabajos	AMGB	3,77	3,69	6,42	3,39	6,42	68,96	35	0,05	10,46	9,26	0,50	0,40
			Después trabajos	AMGB	3,77	3,67	4,73	1,70	4,73	68,96	17	0,02	10,46	9,26	0,50	0,40
2029	1210	0,10	Antes trabajos	AMGB	3,77	3,86	7,44	3,84	7,44	83,62	73	0,10	11,93	9,47	0,50	0,40
			Después trabajos	AMGB	3,77	3,83	5,52	1,92	5,52	83,62	37	0,05	11,93	9,47	0,50	0,40
2030	1295	0,10	Antes trabajos	AMGB	3,76	4,07	8,44	4,14	8,44	91,21	113	0,16	13,60	9,69	0,50	0,39
			Después trabajos	AMGB	3,76	4,02	6,37	2,07	6,37	91,21	56	0,08	13,60	9,69	0,50	0,39
2031	1386	0,11	Antes trabajos	AMGB	3,76	4,32	9,48	4,34	9,48	90,08	149	0,21	15,52	9,91	0,50	0,39

			Después trabajos	AMGB	3,76	4,27	7,31	2,17	7,31	90,08	74	0,11	15,52	9,91	0,50	0,39
2032	1483	0,12	Antes trabajos	AMGB	3,75	4,61	10,63	4,47	10,63	88,86	177	0,25	17,72	10,14	0,50	0,39
			Después trabajos	AMGB	3,75	4,55	8,40	2,24	8,40	88,86	89	0,13	17,72	10,14	0,50	0,39
2033	1587	0,13	Antes trabajos	AMGB	3,75	4,94	11,95	4,55	11,95	87,48	201	0,29	20,24	10,36	0,50	0,39
			Después trabajos	AMGB	3,75	4,88	9,67	2,28	9,67	87,48	100	0,14	20,24	10,36	0,50	0,39
2034	1698	0,14	Antes trabajos	AMGB	3,74	5,32	13,46	4,61	13,46	85,89	222	0,32	23,12	10,59	0,50	0,39
			Después trabajos	AMGB	3,74	5,25	11,16	2,30	11,16	85,89	111	0,16	23,12	10,59	0,50	0,39
2035	1816	0,15	Antes trabajos	AMGB	3,73	5,74	15,22	4,64	15,22	84,06	242	0,35	26,42	10,83	0,50	0,39
			Después trabajos	AMGB	3,73	5,66	12,90	2,32	12,90	84,06	121	0,17	26,42	10,83	0,50	0,39
2036	1944	0,16	Antes trabajos	AMGB	3,72	6,21	17,26	4,66	17,26	81,94	262	0,37	30,20	11,06	0,50	0,39
			Después trabajos	AMGB	3,72	6,13	14,93	2,33	14,93	81,94	131	0,19	30,20	11,06	0,50	0,39
2037	2080	0,17	Antes trabajos	AMGB	3,71	6,74	19,60	4,67	19,60	79,50	283	0,40	34,52	11,30	0,50	0,39
			Después trabajos	AMGB	3,71	6,66	17,27	2,34	17,27	79,50	141	0,20	34,52	11,30	0,50	0,39
2038	2225	0,18	Antes trabajos	AMGB	3,70	7,34	22,29	4,68	22,29	76,71	304	0,43	39,47	11,54	0,50	0,38
			Después trabajos	AMGB	3,70	7,25	19,95	2,34	19,95	76,71	152	0,22	39,47	11,54	0,50	0,38

**Detalles tramo:**

ID:

Descripción: Tomatitas-Erquis Norte

Clase de carretera: Terciaria o local

Longitud:

10.00km

Ancho: 7.00m

**Alternativa: M. rutinario & M. periódico**

Año	TM IMD	ESAL (millones/carril) YE4	Tipo de firme	Número Estructural medio SNPK	Regularidad IRI (m/km) RI	Área Fisurada (%)			Área Peladuras (%) ARV	Baches		Área de rotura de borde (m <sup>2</sup> /km) AEB	Rodera	Textura (mm) TD	Resistencia al deslizamiento SFC50	
						Total estructural ACA	Ancha estructural ACW	Fisuración total ACRA		Número por km NPT	Área (%) APOT		Profundidad media de la rodera (mm) RDM			
2024	863	0,07	Antes trabajos	AMGB	3,79	3,22	1,98	1,23	1,98	8,52	5	0,01	6,24	8,41	0,50	0,40
			Después trabajos	AMGB	3,79	3,25	1,37	0,62	1,37	8,52	2	0,00	6,24	8,41	0,50	0,40
2025	923	0,07	Antes trabajos	AMGB	3,79	3,32	2,96	1,55	2,96	16,75	3	0,00	7,09	8,62	0,50	0,40
			Después trabajos	AMGB	3,79	3,32	2,18	0,78	2,18	16,75	1	0,00	7,09	8,62	0,50	0,40
2026	988	0,08	Antes trabajos	AMGB	3,78	3,44	4,12	2,11	4,12	29,61	2	0,00	8,07	8,83	0,50	0,40
			Después trabajos	AMGB	3,78	3,43	3,06	1,06	3,06	29,61	1	0,00	8,07	8,83	0,50	0,40

2027	1057	0,08	Antes trabajos	AMGB	3,78	3,55	5,30	2,75	5,30	48,59	1	0,00	9,18	9,04	0,50	0,40
			Después trabajos	AMGB	3,78	3,54	3,92	1,38	3,92	48,59	1	0,00	9,18	9,04	0,50	0,40
2028	1131	0,09	Antes trabajos	AMGB	3,77	3,69	6,42	3,39	6,42	68,96	35	0,05	10,46	9,26	0,50	0,40
			Después trabajos	AMGB	3,77	3,67	4,73	1,70	4,73	68,96	17	0,02	10,46	9,26	0,50	0,40
2029	1210	0,10	Antes trabajos	AMGB	3,77	3,86	7,44	3,84	7,44	83,62	73	0,10	11,93	9,47	0,50	0,40
			Después trabajos	AMGB	3,77	3,83	5,52	1,92	5,52	83,62	37	0,05	11,93	9,47	0,50	0,40
2030	1295	0,10	Antes trabajos	AMGB	3,76	4,07	8,44	4,14	8,44	91,21	113	0,16	13,60	9,69	0,50	0,39
			Después trabajos	AMGB	3,76	4,02	6,37	2,07	6,37	91,21	56	0,08	13,60	9,69	0,50	0,39
2031	1386	0,11	Antes trabajos	AMGB	3,76	4,32	9,48	4,34	9,48	90,08	149	0,21	15,52	9,91	0,50	0,39
			Después trabajos	AMGB	3,76	4,27	7,31	2,17	7,31	90,08	74	0,11	15,52	9,91	0,50	0,39
2032	1483	0,12	Antes trabajos	AMGB	3,75	4,61	10,63	4,47	10,63	88,86	177	0,25	17,72	10,14	0,50	0,39
			Después trabajos	STAP	3,75	4,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	10,14	0,70	0,39
2033	1587	0,13	Antes trabajos	STAP	3,81	4,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2,52	10,36	0,67	0,39
			Después trabajos	STAP	3,81	4,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2,52	10,36	0,67	0,39
2034	1698	0,14	Antes trabajos	STAP	3,81	4,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	5,40	10,58	0,67	0,39
			Después trabajos	STAP	3,81	4,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	5,40	10,58	0,67	0,39
2035	1816	0,15	Antes trabajos	STAP	3,81	4,96	0,50	0,00	0,50	0,00	0	0,00	8,70	10,80	0,67	0,39
			Después trabajos	STAP	3,81	4,96	0,50	0,00	0,50	0,00	0	0,00	8,70	10,80	0,67	0,39
2036	1944	0,16	Antes trabajos	STAP	3,81	5,12	2,27	0,00	2,27	0,00	0	0,00	12,47	11,03	0,67	0,39
			Después trabajos	STAP	3,81	5,12	2,27	0,00	2,27	0,00	0	0,00	12,47	11,03	0,67	0,39
2037	2080	0,17	Antes trabajos	STAP	3,81	5,31	5,81	0,00	5,81	0,00	0	0,00	16,80	11,25	0,67	0,39
			Después trabajos	STAP	3,81	5,31	5,81	0,00	5,81	0,00	0	0,00	16,80	11,25	0,67	0,39
2038	2225	0,18	Antes trabajos	STAP	3,79	5,51	11,56	2,58	11,56	0,00	0	0,00	21,75	11,49	0,67	0,38
			Después trabajos	STAP	3,79	5,51	10,27	1,29	10,27	0,00	0	0,00	21,75	11,49	0,67	0,38

**Detalles tramo:**

ID: Descripción: Tomatitas-Erquis Norte

Clase de carretera: Terciaria o local

Longitud: 10.00km Ancho: 7.00m

**Alternativa: M. rutinario & M. periódico + Rehabilitación**

Año	TM IMD	ESAL (millones/carril) YE4		Tipo de firme	Número Estructural	Regularidad IRI	Área Fisurada (%)			Área Peladuras (%) ARV	Baches		Área de rotura de borde	Rodenas	Textura (mm) TD	Resistencia al deslizamiento SFC50
											Área (%) APOT	Profundidad media de la				

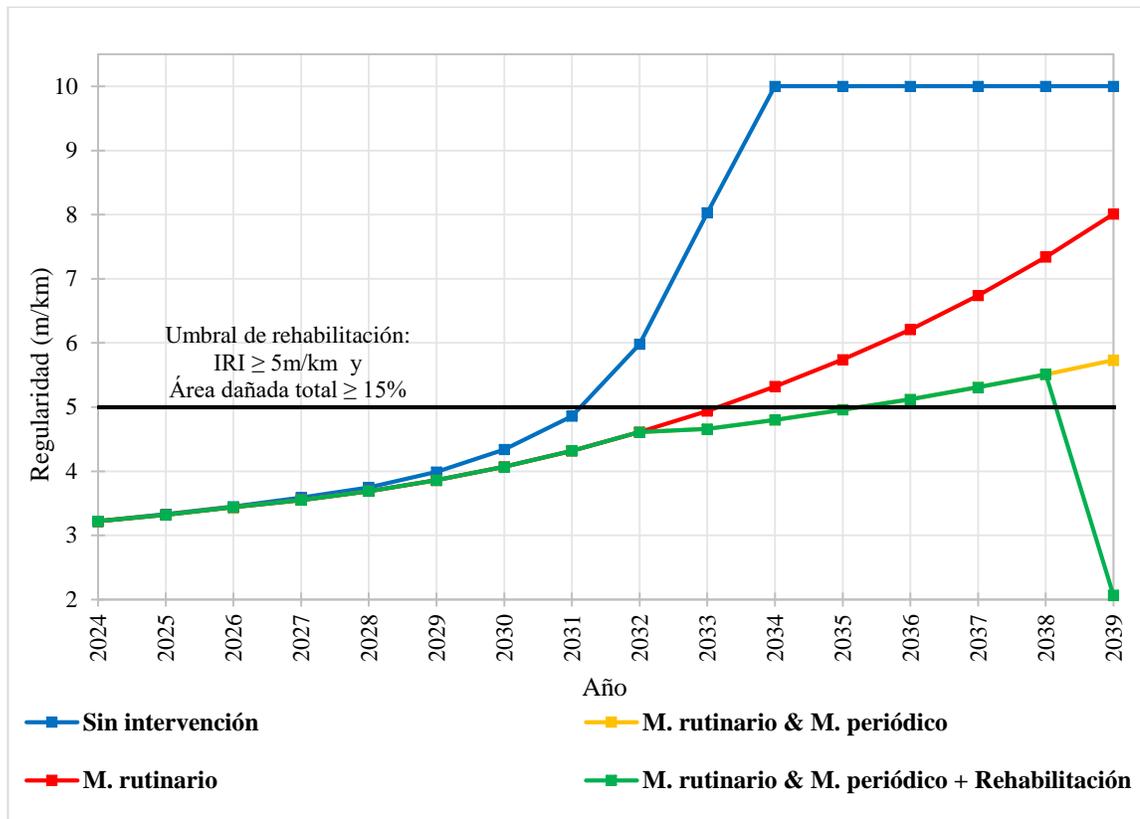
					medio SNPK	(m/km) RI	Total estructural ACA	Ancha estructural ACW	Fisuración total ACRA		Número por km NPT		(m <sup>2</sup> /km) AEB	rodera (mm) RDM		
2024	863	0,07	Antes trabajos	AMGB	3,79	3,22	1,98	1,23	1,98	8,52	5	0,01	6,24	8,41	0,50	0,40
			Después trabajos	AMGB	3,79	3,25	1,37	0,62	1,37	8,52	2	0,00	6,24	8,41	0,50	0,40
2025	923	0,07	Antes trabajos	AMGB	3,79	3,32	2,96	1,55	2,96	16,75	3	0,00	7,09	8,62	0,50	0,40
			Después trabajos	AMGB	3,79	3,32	2,18	0,78	2,18	16,75	1	0,00	7,09	8,62	0,50	0,40
2026	988	0,08	Antes trabajos	AMGB	3,78	3,44	4,12	2,11	4,12	29,61	2	0,00	8,07	8,83	0,50	0,40
			Después trabajos	AMGB	3,78	3,43	3,06	1,06	3,06	29,61	1	0,00	8,07	8,83	0,50	0,40
2027	1057	0,08	Antes trabajos	AMGB	3,78	3,55	5,30	2,75	5,30	48,59	1	0,00	9,18	9,04	0,50	0,40
			Después trabajos	AMGB	3,78	3,54	3,92	1,38	3,92	48,59	1	0,00	9,18	9,04	0,50	0,40
2028	1131	0,09	Antes trabajos	AMGB	3,77	3,69	6,42	3,39	6,42	68,96	35	0,05	10,46	9,26	0,50	0,40
			Después trabajos	AMGB	3,77	3,67	4,73	1,70	4,73	68,96	17	0,02	10,46	9,26	0,50	0,40
2029	1210	0,10	Antes trabajos	AMGB	3,77	3,86	7,44	3,84	7,44	83,62	73	0,10	11,93	9,47	0,50	0,40
			Después trabajos	AMGB	3,77	3,83	5,52	1,92	5,52	83,62	37	0,05	11,93	9,47	0,50	0,40
2030	1295	0,10	Antes trabajos	AMGB	3,76	4,07	8,44	4,14	8,44	91,21	113	0,16	13,60	9,69	0,50	0,39
			Después trabajos	AMGB	3,76	4,02	6,37	2,07	6,37	91,21	56	0,08	13,60	9,69	0,50	0,39
2031	1386	0,11	Antes trabajos	AMGB	3,76	4,32	9,48	4,34	9,48	90,08	149	0,21	15,52	9,91	0,50	0,39
			Después trabajos	AMGB	3,76	4,27	7,31	2,17	7,31	90,08	74	0,11	15,52	9,91	0,50	0,39
2032	1483	0,12	Antes trabajos	AMGB	3,75	4,61	10,63	4,47	10,63	88,86	177	0,25	17,72	10,14	0,50	0,39
			Después trabajos	STAP	3,75	4,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	10,14	0,70	0,39
2033	1587	0,13	Antes trabajos	STAP	3,81	4,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2,52	10,36	0,67	0,39
			Después trabajos	STAP	3,81	4,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2,52	10,36	0,67	0,39
2034	1698	0,14	Antes trabajos	STAP	3,81	4,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	5,40	10,58	0,67	0,39
			Después trabajos	STAP	3,81	4,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	5,40	10,58	0,67	0,39
2035	1816	0,15	Antes trabajos	STAP	3,81	4,96	0,50	0,00	0,50	0,00	0	0,00	8,70	10,80	0,67	0,39
			Después trabajos	STAP	3,81	4,96	0,50	0,00	0,50	0,00	0	0,00	8,70	10,80	0,67	0,39
2036	1944	0,16	Antes trabajos	STAP	3,81	5,12	2,27	0,00	2,27	0,00	0	0,00	12,47	11,03	0,67	0,39
			Después trabajos	STAP	3,81	5,12	2,27	0,00	2,27	0,00	0	0,00	12,47	11,03	0,67	0,39
2037	2080	0,17	Antes trabajos	STAP	3,81	5,31	5,81	0,00	5,81	0,00	0	0,00	16,80	11,25	0,67	0,39
			Después trabajos	STAP	3,81	5,31	5,81	0,00	5,81	0,00	0	0,00	16,80	11,25	0,67	0,39
2038	2225	0,18	Antes trabajos	STAP	3,79	5,51	11,56	2,58	11,56	0,00	0	0,00	21,75	11,49	0,67	0,38
			Después trabajos	AMAP	3,79	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,70	0,38

Fuente: Software HDM-4

### 3.6.7. Evolución de la rugosidad

En el siguiente gráfico se puede observar cómo será la evolución de la regularidad hasta llegar al “punto gatillo” o umbral definido según los criterios de intervención. Una vez sobrepasado este umbral (año 2038), se ejecuta el trabajo de rehabilitación que dura 1 año (2038-2039), mismo que es precedido por las labores de mantenimiento rutinario y mantenimiento periódico programados para un periodo de análisis de 15 años.

**Gráfico 3.9. Evolución de la regularidad para el periodo de análisis**

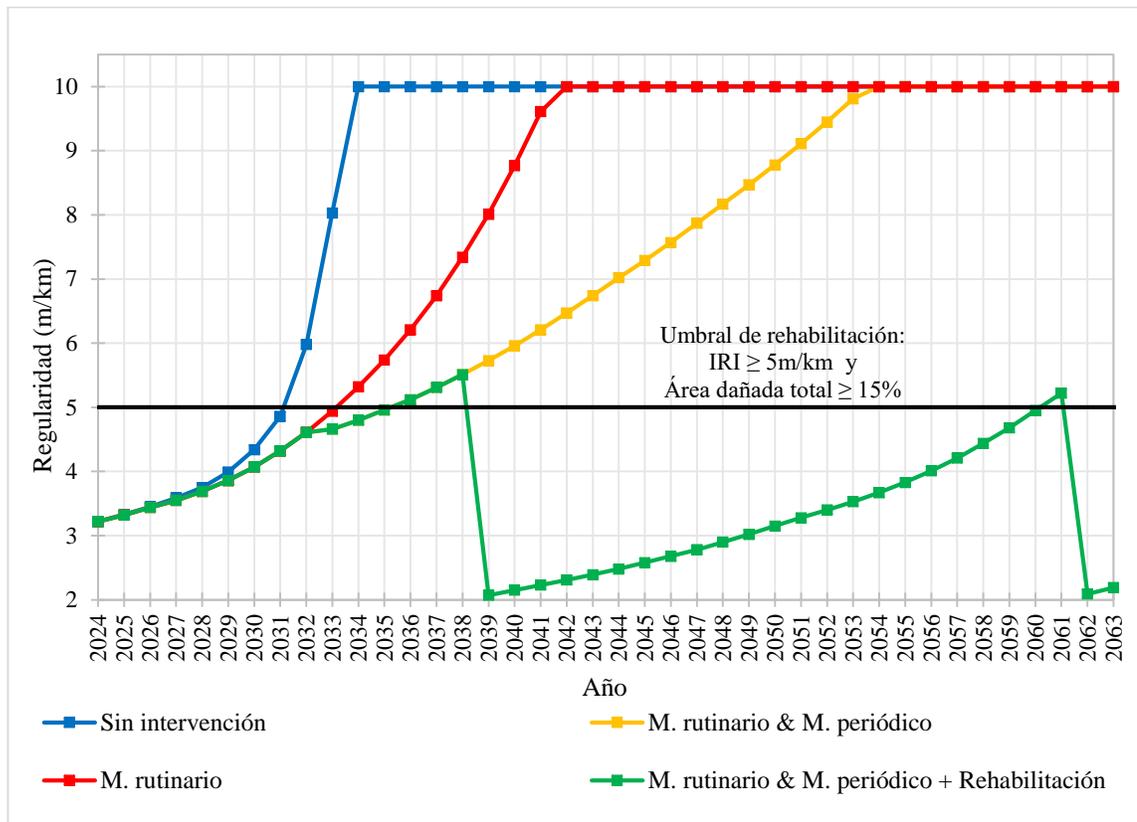


**Fuente:** Mejorado del software HDM-4

El concepto general del ciclo de vida de una carretera, ahora lo podemos observar de forma práctica en el gráfico anterior.

Para comprender de mejor manera lo que se quiere mostrar en cuanto a la evolución del deterioro de la vía, se muestra el siguiente gráfico, que es básicamente el mismo que el presentado anteriormente, pero se puede observar de mejor manera cómo será el comportamiento del pavimento en el tiempo, ya que se realiza un análisis de 40 años.

**Gráfico 3.10. Evolución de la regularidad en el tiempo**



Fuente: Mejorado del software HDM-4

En el gráfico anterior, además de la evolución del deterioro, podemos observar los efectos que tienen cada uno de los estándares o trabajos realizados en el tramo con respecto a la curva “Sin intervención”.

### 3.6.8. Calendario de actuaciones por año

En el siguiente informe, se analiza la cantidad de trabajo que se deberá ejecutar anualmente o en función del tipo de intervención, de igual manera se considera el costo por año y el costo total del mantenimiento vial durante el periodo de análisis.

Es importante mencionar que previo a la generación del informe mostrado, se realizó el análisis de los precios unitarios para cada uno de los trabajos que conforman los estándares de mantenimiento que fueron definidos en un inicio.

**Tabla 3.22. Calendario de actuaciones (por año)**

**H D M - 4**

**Calendario de actuaciones (por año)**

HIGHWAY DEVELOPMENT & MANAGEMENT

Nombre del estudio:

Fecha ejecución: **24-07-2024**

**Todos los costes se expresan en : Bs Bolivianos.**

Nota: sólo se muestran tramos que tienen actuaciones activadas.

<b>Alternativa: M. rutinario</b> <b>Tramo: Tomatitas-Erquis Norte</b> <b>Tipo rodadura: Bituminosa</b> <b>Longitud: 10.00 km Ancho: 7.00 m</b>					
<b>Año</b>	<b>Descripción</b>	<b>Código</b>	<b>Cantidad de trabajo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Coste económico</b>
2024	Bacheo	MR	2,4	m <sup>2</sup>	309,74
	Sellado de fisuras	MR	430,65	m <sup>2</sup>	14857,32
2025	Bacheo	MR	1,45	m <sup>2</sup>	187,42
	Sellado de fisuras	MR	543,02	m <sup>2</sup>	18734,06
2026	Bacheo	MR	0,89	m <sup>2</sup>	114,47
	Sellado de fisuras	MR	738,8	m <sup>2</sup>	25488,47
2027	Bacheo	MR	0,55	m <sup>2</sup>	70,62
	Sellado de fisuras	MR	962,97	m <sup>2</sup>	33222,48
2028	Bacheo	MR	17,48	m <sup>2</sup>	2256,88
	Sellado de fisuras	MR	1187,24	m <sup>2</sup>	40959,61
2029	Bacheo	MR	36,72	m <sup>2</sup>	4741,85
	Sellado de fisuras	MR	1344,89	m <sup>2</sup>	46398,55
2030	Bacheo	MR	56,39	m <sup>2</sup>	7280,77
	Sellado de fisuras	MR	1450,18	m <sup>2</sup>	50031,09
2031	Bacheo	MR	74,46	m <sup>2</sup>	9614,92
	Sellado de fisuras	MR	1519,5	m <sup>2</sup>	52422,66
2032	Bacheo	MR	88,52	m <sup>2</sup>	11430,03
	Sellado de fisuras	MR	1564,67	m <sup>2</sup>	53981,14
2033	Bacheo	MR	100,33	m <sup>2</sup>	12954,39
	Sellado de fisuras	MR	1593,83	m <sup>2</sup>	54987,23
2034	Bacheo	MR	110,96	m <sup>2</sup>	14327,15
	Sellado de fisuras	MR	1612,44	m <sup>2</sup>	55629,34
2035	Bacheo	MR	121,08	m <sup>2</sup>	15633,99
	Sellado de fisuras	MR	1624,12	m <sup>2</sup>	56032,02
2036	Bacheo	MR	131,1	m <sup>2</sup>	16928,18
	Sellado de fisuras	MR	1631,21	m <sup>2</sup>	56276,79
2037	Bacheo	MR	141,29	m <sup>2</sup>	18243,06
	Sellado de fisuras	MR	1635,26	m <sup>2</sup>	56416,6
2038	Bacheo	MR	151,79	m <sup>2</sup>	19599,47
	Sellado de fisuras	MR	1637,26	m <sup>2</sup>	56485,59
<b>Coste total para el tramo:</b>					<b>805615,89</b>

<b>Alternativa: M. rutinario &amp; M. periódico</b> <b>Tramo: Tomatitas-Erquis Norte</b> <b>Tipo rodadura: Bituminosa</b> <b>Longitud: 10.00 km</b> <span style="float: right;"><b>Ancho: 7.00 m</b></span>					
Año	Descripción	Código	Cantidad de trabajo	Unidad	Coste económico
2024	Bacheo	MR	2,4	m <sup>2</sup>	309,74
	Sellado de fisuras	MR	430,65	m <sup>2</sup>	14857,32
2025	Bacheo	MR	1,45	m <sup>2</sup>	187,42
	Sellado de fisuras	MR	543,02	m <sup>2</sup>	18734,06
2026	Bacheo	MR	0,89	m <sup>2</sup>	114,47
	Sellado de fisuras	MR	738,8	m <sup>2</sup>	25488,47
2027	Bacheo	MR	0,55	m <sup>2</sup>	70,62
	Sellado de fisuras	MR	962,97	m <sup>2</sup>	33222,48
2028	Bacheo	MR	17,48	m <sup>2</sup>	2256,88
	Sellado de fisuras	MR	1187,24	m <sup>2</sup>	40959,61
2029	Bacheo	MR	36,72	m <sup>2</sup>	4741,85
	Sellado de fisuras	MR	1344,89	m <sup>2</sup>	46398,55
2030	Bacheo	MR	56,39	m <sup>2</sup>	7280,77
	Sellado de fisuras	MR	1450,18	m <sup>2</sup>	50031,09
2031	Bacheo	MR	74,46	m <sup>2</sup>	9614,92
	Sellado de fisuras	MR	1519,5	m <sup>2</sup>	52422,66
2032	Sellado de capa	MP	70000	m <sup>2</sup>	4811100
	Prep. Bacheo	MP	17,7	m <sup>2</sup>	2286,01
	Prep. Rep. Bordes	MP	17,72	m <sup>2</sup>	611,44
2038	Sellado de fisuras	MR	903,06	m <sup>2</sup>	31155,62
<b>Coste total para el tramo:</b>					<b>5151843,98</b>

<b>Alternativa: M. rutinario &amp; M. periódico+Rehabilitación</b> <b>Tramo: Tomatitas-Erquis Norte</b> <b>Tipo rodadura: Bituminosa</b> <b>Longitud: 10.00 km</b> <span style="float: right;"><b>Ancho: 7.00 m</b></span>					
Año	Descripción	Código	Cantidad de trabajo	Unidad	Coste económico
2024	Bacheo	MR	2,4	m <sup>2</sup>	309,74
	Sellado de fisuras	MR	430,65	m <sup>2</sup>	14857,32
2025	Bacheo	MR	1,45	m <sup>2</sup>	187,42
	Sellado de fisuras	MR	543,02	m <sup>2</sup>	18734,06
2026	Bacheo	MR	0,89	m <sup>2</sup>	114,47
	Sellado de fisuras	MR	738,8	m <sup>2</sup>	25488,47
2027	Bacheo	MR	0,55	m <sup>2</sup>	70,62
	Sellado de fisuras	MR	962,97	m <sup>2</sup>	33222,48
2028	Bacheo	MR	17,48	m <sup>2</sup>	2256,88
	Sellado de fisuras	MR	1187,24	m <sup>2</sup>	40959,61

2029	Bacheo	MR	36,72	m <sup>2</sup>	4741,85
	Sellado de fisuras	MR	1344,89	m <sup>2</sup>	46398,55
2030	Bacheo	MR	56,39	m <sup>2</sup>	7280,77
	Sellado de fisuras	MR	1450,18	m <sup>2</sup>	50031,09
2031	Bacheo	MR	74,46	m <sup>2</sup>	9614,92
	Sellado de fisuras	MR	1519,5	m <sup>2</sup>	52422,66
2032	Sellado de capa	MP	70000	m <sup>2</sup>	4811100
	Prep. Bacheo	MP	17,7	m <sup>2</sup>	2286,01
	Prep. Rep. Bordes	MP	17,72	m <sup>2</sup>	611,44
2038	Sobrecarpeta	RH	70000	m <sup>2</sup>	9667000
	Prep. Rep. Bordes	RH	21,75	m <sup>2</sup>	750,29
<b>Coste total para el tramo:</b>					<b>14788438,65</b>

Fuente: Software HDM-4

### 3.6.9. Resumen de costes económicos totales anuales

Se presenta de manera resumida el total de gastos (en bolivianos) por año para cada tipo de estándar.

**Tabla 3.23. Resumen de costes económicos totales anuales**

	<b>MR</b>	<b>MR&amp;MP</b>	<b>MR&amp;MP+RH</b>
2024	15167,06	15167,06	15167,06
2025	18921,48	18921,48	18921,48
2026	25602,94	25602,94	25602,94
2027	33293,10	33293,10	33293,10
2028	43216,49	43216,49	43216,49
2029	51140,40	51140,40	51140,40
2030	57311,86	57311,86	57311,86
2031	62037,58	62037,58	62037,58
2032	65411,17	4813997,45	4813997,45
2033	67941,62	0,00	0,00
2034	69956,49	0,00	0,00
2035	71666,01	0,00	0,00
2036	73204,97	0,00	0,00
2037	74659,66	0,00	0,00
2038	76085,06	31155,62	9667750,29
<b>Total</b>	<b>805615,89</b>	<b>5151843,98</b>	<b>14788438,65</b>

Fuente: Software HDM-4

**CAPÍTULO IV**  
**PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN**  
**DE RESULTADOS**

## CAPÍTULO IV

### PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. Análisis de resultados de la evaluación superficial

**Tabla 4.1. Resultados PCI**

Progresiva	PCI	Calificación	Causa posible	Límite tolerable PCI $\geq 40$
0+000	51,32	REGULAR	En esta sección de carretera la falla más predominante fueron los bacheos y hundimientos de los mismos, producto de acometidas de alcantarillado sanitario que no se rellenaron y compactaron de manera adecuada.	Cumple
0+030	58,79	BUENO		Cumple
0+060	75,52	MUY BUENO		Cumple
0+090	59,7	BUENO		Cumple
0+120	69	BUENO		Cumple
0+150	68,8	BUENO		Cumple
0+180	64,42	BUENO		Cumple
0+210	63,18	BUENO		Cumple
0+270	84,32	MUY BUENO		Cumple
0+540	94,72	EXCELENTE		El deterioro que más se evidencio en esta zona fueron las grietas longitudinales y transversales.
0+810	92,51	EXCELENTE	Cumple	
1+080	88,74	EXCELENTE	Cumple	
1+350	86,57	EXCELENTE	Cumple	
1+620	79,94	MUY BUENO	Cumple	
1+662,53	66,96	BUENO	Se reveló una cantidad importante de huecos o baches debido a la evolución de otros daños como las grietas y desprendimientos.	Cumple
1+890	58,82	BUENO		Cumple
2+160	67	BUENO		Cumple
2+430	66,9	BUENO		Cumple
2+700	78,28	MUY BUENO	El pavimento no mostró daños significativos, solo algunas grietas longitudinales.	Cumple
2+970	99,59	EXCELENTE		Cumple
3+177,68	54,59	REGULAR	Huecos producto del desprendimiento de tachas reflectivas en reductores de velocidad.	Cumple
3+240	81,37	MUY BUENO		Cumple
3+510	85,46	MUY BUENO		Cumple
3+687,44	34,75	MALO	Daños a la entrada y salida de un puente, posiblemente ocasionados por un mal compactado del material de relleno de los estribos.	No cumple
3+780	79,15	MUY BUENO	Hay varios reductores de velocidad de los cuales en su gran mayoría se despegaron las tachas reflectivas originando así el desprendimiento del agregado y esto evolucionando como baches.	Cumple
4+000	60,3	BUENO		Cumple
4+270	85,59	MUY BUENO		Cumple
4+540	86,56	EXCELENTE		Cumple
4+610,35	57,71	BUENO		Cumple
4+810	85,46	MUY BUENO		Cumple
5+080	72,26	MUY BUENO		Cumple
5+350	76,84	MUY BUENO		Cumple
5+514,50	69,83	BUENO		Cumple
5+620	100	EXCELENTE		Cumple
5+890	91,47	EXCELENTE	Este sector ya no es urbano, sino que es un área rural, donde las viviendas están dispersas y el flujo vehicular reduce considerablemente con relación a las anteriores zonas evaluadas, es por esto que se puede ver un pavimento en muy buenas condiciones, pero siempre registrando daños como exudación, fisuras longitudinales y grietas de borde las mismas son ocasionadas por la falta de bermas en algunos sectores.	Cumple
6+160	99,77	EXCELENTE		Cumple
6+219	73,54	MUY BUENO		Cumple
6+430	74,94	MUY BUENO		Cumple
6+700	92,69	EXCELENTE		Cumple
6+970	84,08	MUY BUENO		Cumple
7+240	85,24	MUY BUENO		Cumple
7+510	96,37	EXCELENTE		Cumple
7+780	85,46	MUY BUENO		Cumple
8+000	85,92	MUY BUENO		Cumple
8+150	100	EXCELENTE		Cumple
8+300	85,04	MUY BUENO		Cumple
8+450	85,46	MUY BUENO		Cumple
8+600	77,45	MUY BUENO		Cumple
8+750	89,12	EXCELENTE		Cumple
8+900	89,46	EXCELENTE		Cumple
9+050	86,3	EXCELENTE		Cumple

9+200	83,46	MUY BUENO		Cumple
9+350	82,05	MUY BUENO		Cumple
9+500	89,73	EXCELENTE		Cumple
9+650	83,14	MUY BUENO		Cumple
9+800	84,39	MUY BUENO		Cumple
9+950	83,74	MUY BUENO		Cumple

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que, los niveles de deterioro de las unidades de muestra evaluadas están por encima de PCI=40, a excepción de la progresiva 3+687,44 con un PCI de 34,75. Este valor según la normativa ASTM D6433-03 es el mínimo que debe presentar un pavimento para otorgar regulares condiciones superficiales, valores PCI por debajo de este sería un pavimento en malas condiciones y fallado.

#### 4.1.1. Análisis de resultados del IRI

Tabla 4.2. Resultados IRI

Progresivas [Km]	Carril		IRI [m/Km]	Calificación	IRI característico 3,22 [m/Km]
	Izquierdo	Derecho			
0+000		X	3,19	Bueno	Cumple
0+400	X		3,41	Bueno	No cumple
0+800		X	3,42	Bueno	No cumple
1+200	X		2,64	Bueno	Cumple
1+600		X	2,91	Bueno	Cumple
2+000	X		2,77	Bueno	Cumple
2+400		X	2,59	Bueno	Cumple
2+800	X		2,17	Bueno	Cumple
3+200		X	2,16	Bueno	Cumple
3+600	X		2,19	Bueno	Cumple
4+000		X	2,24	Bueno	Cumple
4+400	X		2,50	Bueno	Cumple
4+800		X	2,42	Bueno	Cumple
5+200	X		2,18	Bueno	Cumple
5+600		X	2,89	Bueno	Cumple
6+000	X		2,05	Bueno	Cumple
6+400		X	2,27	Bueno	Cumple
6+800	X		2,22	Bueno	Cumple
7+200		X	2,87	Bueno	Cumple
7+600	X		2,71	Bueno	Cumple
8+000		X	1,92	Muy bueno	Cumple
8+400	X		2,95	Bueno	Cumple
8+800		X	2,32	Bueno	Cumple
9+200	X		2,09	Bueno	Cumple
9+600		X	2,37	Bueno	Cumple
10+000	X		2,14	Bueno	Cumple

Fuente: Elaboración propia.

## 4.2. Análisis de resultados de la evaluación estructural

**Tabla 4.3. Resultados Viga Benkelman**

Progresiva [km]	Carril izquierdo	Carril derecho	Deflexión [0,01mm]	Radio de curvatura [m]	Calidad estructural	Deflexión característica $20,95 \times 10^{-2}$ [mm]	Radio de curvatura mínimo 100 [m]
0+000		X	10,04	622,60	Buena	Cumple	Cumple
0+200	X		15,18	617,79	Buena	Cumple	Cumple
0+400		X	9,96	627,40	Buena	Cumple	Cumple
0+600	X		10,08	620,19	Buena	Cumple	Cumple
0+800		X	14,89	629,81	Buena	Cumple	Cumple
1+000	X		20,08	311,30	Buena	Cumple	Cumple
1+200		X	9,92	629,81	Buena	Cumple	Cumple
1+400	X		9,85	634,62	Buena	Cumple	Cumple
1+600		X	14,77	634,62	Buena	Cumple	Cumple
1+800	X		9,89	632,21	Buena	Cumple	Cumple
2+000		X	9,85	634,62	Buena	Cumple	Cumple
2+200	X		9,89	632,21	Buena	Cumple	Cumple
2+400		X	14,66	639,42	Buena	Cumple	Cumple
2+600	X		19,70	317,31	Buena	Cumple	Cumple
2+800		X	14,83	316,11	Buena	Cumple	Cumple
3+000	X		14,66	639,42	Buena	Cumple	Cumple
3+200		X	9,77	639,42	Buena	Cumple	Cumple
3+400	X		19,55	639,42	Buena	Cumple	Cumple
3+600		X	19,62	318,51	Buena	Cumple	Cumple
3+800	X		9,77	639,42	Buena	Cumple	Cumple
4+000		X	14,77	634,62	Buena	Cumple	Cumple
4+200	X		14,55	644,23	Buena	Cumple	Cumple
4+400		X	9,74	641,83	Buena	Cumple	Cumple
4+600	X		4,85	644,23	Buena	Cumple	Cumple
4+800		X	14,66	639,42	Buena	Cumple	Cumple
5+000	X		14,44	649,04	Buena	Cumple	Cumple
5+200		X	14,72	318,51	Buena	Cumple	Cumple
5+400	X		9,63	649,04	Buena	Cumple	Cumple
5+600		X	14,72	637,02	Buena	Cumple	Cumple
5+800	X		4,81	649,04	Buena	Cumple	Cumple
6+000		X	19,48	641,83	Buena	Cumple	Cumple
6+200	X		9,59	651,44	Buena	Cumple	Cumple
6+400		X	14,66	639,42	Buena	Cumple	Cumple
6+600	X		19,19	325,72	Buena	Cumple	Cumple
6+800		X	19,48	320,91	Buena	Cumple	Cumple
7+000	X		14,23	658,65	Buena	Cumple	Cumple
7+200		X	29,21	641,83	Buena	No cumple	Cumple
7+400	X		9,52	656,25	Buena	Cumple	Cumple
7+600		X	14,61	641,83	Buena	Cumple	Cumple
7+800	X		14,39	651,44	Buena	Cumple	Cumple
8+000		X	19,40	644,23	Buena	Cumple	Cumple
8+200	X		9,59	651,44	Buena	Cumple	Cumple
8+400		X	14,55	644,23	Buena	Cumple	Cumple
8+600	X		14,50	646,63	Buena	Cumple	Cumple
8+800		X	14,50	646,63	Buena	Cumple	Cumple
9+000	X		14,44	649,04	Buena	Cumple	Cumple
9+200		X	14,34	653,85	Buena	Cumple	Cumple
9+400	X		14,39	651,44	Buena	Cumple	Cumple
9+600		X	14,23	658,65	Buena	Cumple	Cumple
9+800	X		9,52	656,25	Buena	Cumple	Cumple

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que, solo en un punto la deflexión media supera a la deflexión característica.

Al no haber fallas de origen estructural a lo largo del tramo de estudio, se puede decir que la estructura está bien diseñada y observando la siguiente tabla, las necesidades de mantenimiento actualmente solo se basan en corregir fallas de origen superficial y las soluciones de estas dependerán de los defectos observados y sus causas.

### 4.3. Tratamiento estadístico del PCI

#### 4.3.1. Estadística descriptiva

**Tabla 4.4. Distribución de frecuencias observadas  $f_o$**

Sub Tramo	Excelente	Muy bueno	Bueno	Regular	Malo	Muy malo	Fallado	Total
Sub Tramo 1	5	5	10	2	0	0	0	22
Sub Tramo 2	4	8	3	0	1	0	0	16
Sub Tramo 3	7	12	0	0	0	0	0	19
<b>Total</b>	<b>16</b>	<b>25</b>	<b>13</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>57</b>

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.5. Cálculo de frecuencias esperadas  $f_e$**

Sub Tramo	Excelente	Muy bueno	Bueno	Regular	Malo	Muy malo	Fallado
Sub Tramo 1	6,175	9,649	5,018	0,772	0,386	0	0
Sub Tramo 2	4,491	7,018	3,649	0,561	0,281	0	0
Sub Tramo 3	5,333	8,333	4,333	0,667	0,333	0	0

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.6. Determinación del  $\chi^2$  calculado**

Sub Tramo	Excelente	Muy bueno	Bueno	Regular	Malo	Muy malo	Fallado
Sub Tramo 1	0,224	2,240	4,948	1,954	0,386	0	0
Sub Tramo 2	0,054	0,138	0,115	0,561	1,843	0	0
Sub Tramo 3	0,521	1,613	4,333	0,667	0,333	0	0

Fuente: Elaboración propia.

$$\chi_{cal}^2 = \sum \frac{(f_o - f_e)^2}{f_e} = 19,93$$

#### 4.3.2. Estadística inferencial

**Hipótesis:** “El tramo Tomatitas–Erquis Norte no requiere de mantenimiento y rehabilitación por tener Categoría bueno”.

**H<sub>0</sub>:** “El tramo Tomatitas–Erquis Norte no requiere de mantenimiento y rehabilitación por tener Categoría bueno”.

**H<sub>1</sub>:** “El tramo Tomatitas–Erquis Norte requiere de mantenimiento y rehabilitación por tener Categoría malo”.

### Determinación del $\chi^2$ crítico

$$n = (n_{fil} - 1) * (n_{col} - 1)$$

$$n = (3 - 1) * (7 - 1) = 12$$

$$\alpha = 0,05$$

$$\chi_{cr}^2 = 21,03$$

### Comparación de valores

$$\chi_{cal}^2 > \chi_{cr}^2 \rightarrow H_0 \text{ cae en zona de rechazo}$$

$$19,93 > 21,03 \rightarrow \text{Falso} \therefore H_0 \text{ cae en zona de aceptación}$$

### Conclusión de la prueba

La hipótesis nula es aceptada; por lo tanto, se puede establecer que la hipótesis de investigación al estar emparejada con esta, se confirma que, pese a las fallas, todavía existe una buena condición de todo el tramo en general.

## 4.4. Tratamiento estadístico del IRI

### 4.4.1. Estadística descriptiva

**Tabla 4.7. Distribución de frecuencias observadas  $f_o$**

Sub tramo	Muy bueno	Bueno	Regular	Malo	Total
Ida	1	12	0	0	13
Vuelta	0	13	0	0	13
<b>Total</b>	<b>1</b>	<b>25</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>26</b>

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.8. Cálculo de frecuencias esperadas  $f_e$**

Sub tramo	Muy bueno	Bueno	Regular	Malo
Ida	0,5	12,5	0	0
Vuelta	0,5	12,5	0	0

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.9. Determinación del  $\chi^2$  calculado**

Sub tramo	Muy bueno	Bueno	Regular	Malo
Ida	0,5	0,02	0	0
Vuelta	0,5	0,02	0	0

**Fuente:** Elaboración propia.

$$\chi_{cal}^2 = \sum \frac{(f_o - f_e)^2}{f_e} = 1,04$$

#### 4.4.2. Estadística inferencial

**Hipótesis:** “El tramo Tomatitas–Erquis Norte no requiere de mantenimiento y rehabilitación por tener Categoría bueno”.

**H<sub>0</sub>:** “El tramo Tomatitas–Erquis Norte no requiere de mantenimiento y rehabilitación por tener Categoría bueno”.

**H<sub>1</sub>:** “El tramo Tomatitas–Erquis Norte requiere de mantenimiento y rehabilitación por tener Categoría malo”.

#### Determinación del $\chi^2$ crítico

$$n = (n_{fil} - 1) * (n_{col} - 1)$$

$$n = (2 - 1) * (4 - 1) = 3$$

$$\alpha = 0,05$$

$$\chi_{cr}^2 = 7,81$$

#### Comparación de valores

La condición siempre es:

$$\chi_{cal}^2 > \chi_{cr}^2 \rightarrow H_0 \text{ cae en zona de rechazo}$$

$$1,04 > 7,81 \rightarrow \text{Falso} \therefore H_0 \text{ cae en zona de aceptación}$$

#### Conclusión de la prueba

La hipótesis nula es aceptada; por lo tanto, se puede establecer que la hipótesis de investigación al estar emparejada con esta, se confirma que, pese a las fallas, todavía existe una buena condición de todo el tramo en general.

## 4.5. Tratamiento estadístico de la evaluación estructural

### 4.5.1. Estadística descriptiva

Rango:

$$\text{Rango} = R_{\text{máx}} - R_{\text{mín}}$$

$$\text{Rango} = 29,21 - 4,81$$

$$\text{Rango} = \mathbf{24,40}$$

Número de clases:

$$NC = 1 + 3,322 * \log(n)$$

$$NC = 1 + 3,322 * \log(50)$$

$$NC = \mathbf{6,64 \approx 7}$$

Ancho de clase:

$$A = \frac{\text{Rango}}{NC}$$

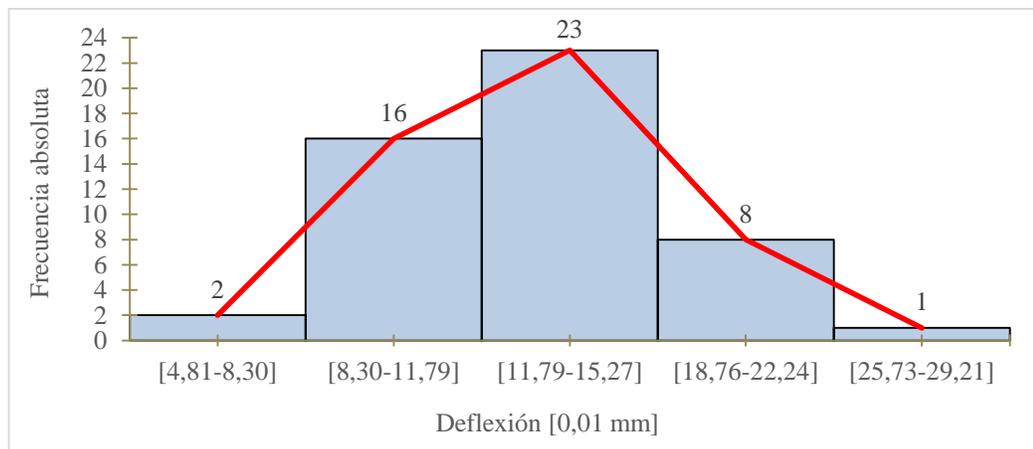
$$A = \frac{24,40}{7} = \mathbf{3,49}$$

Tabla 4.10. Distribución de frecuencias

intervalo de clase	Marca de clase [0,01 mm]	Frecuencia absoluta	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa [%]	Frecuencia relativa acumulada [%]
[ 4,81-8,30 ]	6,52	2	2	4	4
[8,30-11,79]	10,02	16	18	32	36
[11,79-15,27]	13,51	23	41	46	82
[15,27-18,76]	17,00	0	41	0	82
[18,76-22,24]	20,49	8	49	16	98
[22,24-25,73]	23,98	0	49	0	98
[25,73-29,21]	27,47	1	50	2	100
$\Sigma$		<b>50</b>		<b>100</b>	

Fuente: Elaboración propia.

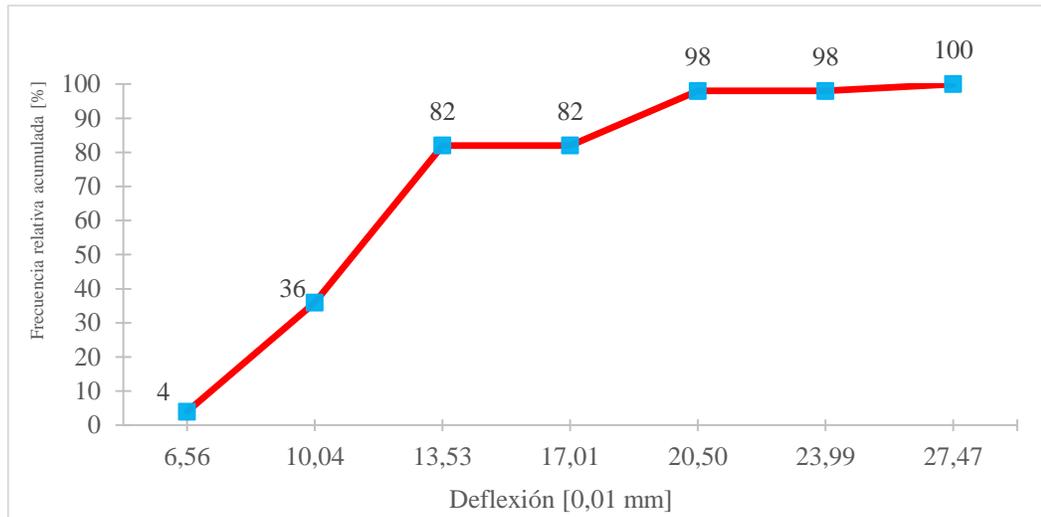
Gráfico 4.1. Histograma y polígono de frecuencias



Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo el histograma de frecuencias donde se puede observar que en el intervalo de clase 11,79 a 15,27x10<sup>-2</sup>mm, se tiene la mayor frecuencia con 23 datos, a priori podemos indicar que la forma del histograma sigue una distribución normal de frecuencias.

**Gráfico 4.2. Polígono de frecuencias acumuladas (ojiva)**



**Fuente:** Elaboración propia.

En la ojiva estadística podemos ver que la mayor concentración de datos se encuentra entre las marcas de clase 10,04 y 13,53x10<sup>-2</sup>mm, esto debido a que la pendiente de ese segmento es más pronunciada que las demás.

**Medidas de tendencia central:**

**Media**

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

**Mediana**

$$Me = L_i + \frac{\frac{n}{2} - F_{i-1}}{f_i} * A$$

**Medidas de dispersión:**

**Varianza**

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

**Desviación estándar**

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

A continuación, se presenta un resumen de las medidas de tendencias central y de dispersión, para este cálculo se utilizó la herramienta informática Excel.

**Tabla 4.11. Resumen del análisis descriptivo**

N° de muestras	50
Sumatoria	687,69
Media	13,75
Mediana	14,47
Desviación estándar	4,37
Varianza	19,14
Rango	24,40
Mínimo	4,81
Máximo	29,21
Número de clases	7,00
Ancho de clase	3,49

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.5.2. Intervalo de confianza

El intervalo de confianza describe la variabilidad entre la medida obtenida en un estudio y la medida real de la población (el valor real). Se lo determina mediante la siguiente fórmula.

$$\mu = \bar{x} \pm Z \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$\text{Límite Superior: } \mu = 13,75 + 1,64 \frac{4,37}{\sqrt{50}} = 14,77 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

$$\text{Límite Inferior: } \mu = 13,75 - 1,64 \frac{4,37}{\sqrt{50}} = 12,74 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

$$12,74 \leq \bar{x} \leq 14,77$$

#### 4.5.3. Estadística inferencial

**Hipótesis:** “El tramo Tomatitas–Erquis Norte no requiere de mantenimiento y rehabilitación por tener Categoría bueno”.

Se propone la siguiente formulación de hipótesis y su contraria a la interpretada.

$$H_0: \bar{x} \leq \mu$$

$$H_1: \bar{x} > \mu$$

Al ser una muestra grande ( $n > 30$ ), se aplicará la prueba **Z**, el estadístico para dicha prueba se calcula de la siguiente manera:

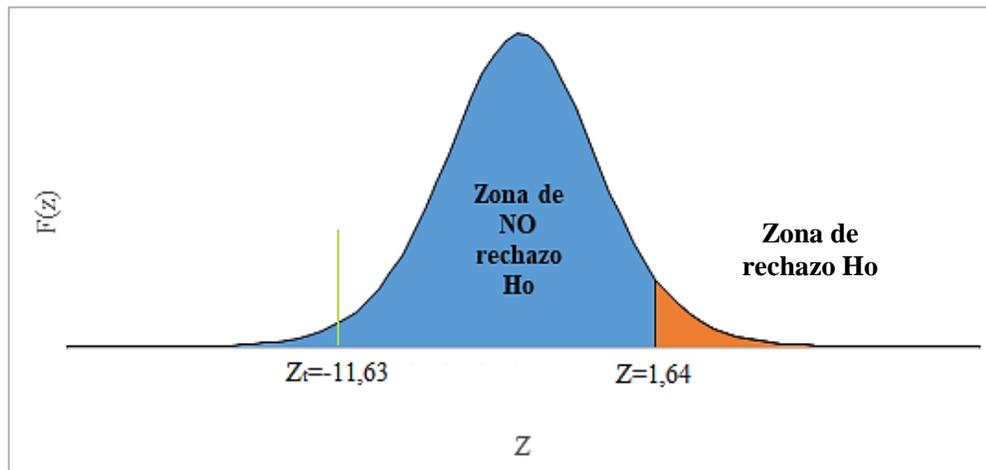
$$Z_c = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{S}{\sqrt{n}}}$$

$$Z_c = \frac{13,75 - 20,95}{\frac{4,37}{\sqrt{50}}}$$

$$Z_c = -11,63$$

Para un nivel de significancia propuesto de  $\alpha = 0,05$  el valor de la variable estandarizada será  $Z_t = 1,64$  de cola derecha. Se debe comparar los valores entre el estadístico calculado y estandarizado, determinando así la región de aceptación.

**Gráfico 4.3. Región de rechazo o no rechazo de la hipótesis nula**



**Fuente:** Elaboración propia.

Si:  $Z_c \leq Z \therefore H_0$  cae en región de aceptación

$-11,63 \leq 1,64 \rightarrow$  Verdadero  $\therefore H_0$  no se debe rechazar

### **Conclusión de la prueba**

La hipótesis nula es aceptada; por lo tanto, se puede establecer que la hipótesis de investigación al estar emparejada con esta, se confirma que, pese a las fallas, todavía existe una buena condición de todo el tramo en general.

#### **4.6. Análisis técnico–económico de la planificación realizada**

Con el análisis técnico–económico se pretende mostrar cómo la combinación de estándares y las estrategias de actuación influyen en el comportamiento del pavimento a lo largo de su vida útil.

La primera combinación de estándares analizada, fue la de ejecutar únicamente mantenimientos de tipo rutinario, dicho estándar comprende los trabajos de bacheo y sellado de fisuras cada año a lo largo del periodo de análisis. Económicamente hablando es la opción más rentable, ya que estos trabajos tienen un costo de **805615,89 Bs.** Si, solo se pretende realizar este tipo de trabajos sin programar mantenimientos periódicos, técnicamente no es una buena opción, ya que el deterioro en la vía evolucionará rápidamente a tal punto de necesitar una reconstrucción.

Determinado el comportamiento del deterioro, podemos ver la necesidad de una intervención de tipo periódico, es decir, aplicar un sello asfáltico previamente reparados el 100% de baches y fisuras. Técnicamente, la combinación del trabajo rutinario seguido del periódico, es una buena alternativa de mantenimiento, ya que mejorará el nivel de servicio al usuario, pero se debe tener muy en cuenta que un sello no tiene una vida útil considerable, además que no representa un aporte a la estructura de la vía. Este estándar tiene un costo **5151843,98 Bs.**

Se propuso fijar un umbral de rehabilitación que nos revele el momento aproximado donde se deberán realizar los trabajos para la aplicación de una sobrecarpeta o carpeta de refuerzo, técnicamente es una excelente alternativa ya que con una nueva rodadura la vía tendrá las mismas condiciones tanto superficiales como estructurales que tenía en su puesta en servicio. El costo de los trabajos de rehabilitación más el de los estándares programados inicialmente es de **14788438,65 Bs.** De no realizar una rehabilitación oportuna la vía tendrá un ciclo de vida “fatal” ya que para volver a tener condiciones de servicio óptimas será necesario una reconstrucción, lo que significaría un gasto mucho mayor al de una rehabilitación, ya que además de tener una rodadura completamente fallada, se verían comprometidas las capas inferiores.

#### 4.7. Especificaciones técnicas de los trabajos de mantenimiento

Actividad	Bacheo superficial	Producción promedio	24 [m <sup>2</sup> /día]	Unidad de medida	[m <sup>2</sup> ]
<b>DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD</b>					
Consiste en la reparación de baches y el reemplazo de áreas de pavimento que se encuentran deterioradas, con una nueva mezcla asfáltica en caliente en espesores no mayores a 10 cm, siempre que afecten exclusivamente a la carpeta asfáltica, encontrándose en buenas condiciones la base granular y las capas inferiores.					
<b>PROPÓSITO</b>					
Recuperar las condiciones para una adecuada circulación vehicular con seguridad, comodidad, rapidez y economía. Además, para minimizar y/o retardar la formación de daños más severos en el pavimento.					
<b>CRITERIO PARA LA EJECUCIÓN</b>			<b>NIVEL DE MANTENIMIENTO</b>		
Preferentemente antes de la época de lluvias, lo más pronto posible, después de que se han desarrollado los desprendimientos y su aparición es visible en el pavimento.			Condiciones del pavimento adecuadas para la circulación vehicular.		
<b>PROCEDIMIENTO</b>					
<ol style="list-style-type: none"> <li>Colocar señales preventivas y dispositivos de seguridad que garanticen la seguridad de los trabajadores y el ordenamiento del tránsito vehicular sin riesgo de accidentes.</li> <li>El personal debe contar con los uniformes, cascos y todos los elementos de seguridad industrial de acuerdo con normas establecidas.</li> <li>Identificar las áreas deterioradas y proceder a delimitarlas con pintura dándoles forma rectangular o cuadrada con sus lados paralelos y perpendiculares al eje de la calzada y excedidas 15 cm de la superficie dañada.</li> <li>Demoler la carpeta asfáltica existente en el área demarcada empleando las sierras o los martillos rompe asfaltos comenzando dentro del perímetro demarcado. Las paredes deben quedar parejas y verticales.</li> <li>Remover los fragmentos, cargarlos en el camión, transportar los escombros hasta las zonas autorizadas, descargarlos y distribuirlos uniformemente.</li> <li>Regularizar y recompactar con la plancha vibratoria la capa de base expuesta, añadiendo agua uniformemente para incrementar su contenido de humedad de ser necesario, especial atención deberá darse a la compactación en las áreas próximas al perímetro del bache.</li> <li>Las paredes y fondo de la zona del bache, deben limpiarse mediante un barrido energético, que elimine todas las partículas sueltas y luego, de preferencia mediante soplado; las paredes deben quedar firmes y perfectamente limpias.</li> <li>Impregnar con asfalto diluido o emulsión la superficie expuesta de la base, así como en los bordes verticales de la carpeta asfáltica existente. El material de imprimación deberá cumplir lo establecido en la Sección 5.11.2.1 ETG 2-11 Carpeta de concreto asfáltico mezclado en caliente de las Especificaciones Técnicas Generales.</li> <li>Colocar la mezcla asfáltica mediante rastrillos, con el espesor suelto necesario para que una vez compactada quede ligeramente sobre el nivel de la superficie de rodadura (alrededor de 0,3 cm). Se deben utilizar, de preferencia, mezclas asfálticas de tipo CA 60-70 o CA 85-100. Su dosificación se deberá ajustar a lo señalado en la Sección ETG 2-11 Carpeta de concreto asfáltico mezclado en caliente de las Especificaciones Técnicas Generales.</li> <li>La compactación se deberá realizar con un rodillo neumático o liso <math>\geq 3</math> t de peso. Alternativamente podrá usarse un rodillo manual, si el espesor de la capa por compactar es menor de 5 cm. complementar la compactación con placa vibratoria en las esquinas y áreas que son inaccesibles al rodillo.</li> <li>Verificar que no existan irregularidades en la superficie y corregirlas si es preciso agregando mezcla.</li> <li>Recoger todo material suelto que pudiera quedar.</li> <li>Al terminar los trabajos, retirar las señales y dispositivos de seguridad en forma inversa a cómo fueron colocados.</li> </ol>					
<b>MEDICIÓN</b>					
Se realizará en metros cuadrados de mezcla compactada aprobada y ejecutada conforme estas especificaciones. El transporte de la mezcla asfáltica y cualquier otra operación necesaria para la ejecución de la actividad, no se medirá para efectos de pago.					

<b>Actividad</b>	Sellado de fisuras	<b>Producción promedio</b>	700 [m/día]	<b>Unidad de medida</b>	[m]
<b>DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD</b>					
Esta actividad consiste en el sello de fisuras (aberturas iguales o menores a 3 mm) y grietas (aberturas mayores a 3 mm), mediante la colocación de materiales especiales sobre o dentro del deterioro.					
<b>PROPÓSITO</b>					
Evitar la infiltración de agua dentro las capas inferiores del pavimento, prevenir la introducción de partículas extrañas que restrinjan los movimientos de dilatación y contracción debidos a cambios de temperatura, retardar la formación de agrietamientos severos y posterior aparición de baches.					
<b>CRITERIO PARA LA EJECUCIÓN</b>			<b>NIVEL DE MANTENIMIENTO</b>		
Deberá ser ejecutada en el menor tiempo posible, después de que se ha identificado su presencia, preferentemente antes de la época de lluvias.			Condiciones de la capa de rodadura adecuadas, libres de infiltraciones de agua e inserción de material granular fino.		
<b>PROCEDIMIENTO</b>					
<ol style="list-style-type: none"> <li>Colocar señales preventivas y dispositivos de seguridad para evitar accidentes con los vehículos.</li> <li>El personal debe contar con los uniformes, cascos, chalecos reflectivos y todos los elementos de seguridad industrial de acuerdo con las normas establecidas.</li> <li>Identificar las zonas de fisuras y grietas a sellar, procediendo a marcarlas directamente sobre el pavimento con yeso, tiza u otro material de color visible (preferiblemente blanco).</li> <li>Previamente y dependiendo del espesor y el tipo de agrietamiento, se seleccionará el tipo de material más apropiado, los cuales podrán ser cemento asfáltico, asfalto rebajado (los cuales poseen poca flexibilidad y muy susceptibles a cambios de temperatura), asfaltos modificados con polímeros, etc.</li> <li>Realizar la limpieza de la superficie objeto de trabajo utilizando escobillado y un chorro de aire a presión, limpio y seco (sin aceite ni humedad), generado por un compresor móvil.</li> <li>Aplicar el material sellante tomando especial cuidado de producir una adherencia efectiva del sellante con las paredes de la fisura y/o grieta. Para este cometido se deberá tener muy en cuenta la temperatura tanto de calentado como de aplicación del sellante, sea este de base asfáltica, epóxica o poliuretánica.</li> <li>Al tender el sellante sobre la grieta, no debe permitirse la formación de charcos o exceso de material sellante sobre la misma o que fluya por la superficie circundante, debido principalmente a que afecta negativamente la estética de la vía y ocasiona un leve impacto negativo en la comodidad y seguridad.</li> <li>El mezclado o preparación de las mezclas deberá realizarse por medio de equipos mecánicos adecuados que aseguren productos homogéneos y que sean muy maniobrables ya que es un trabajo que debe hacerse bastante rápido en la carretera.</li> <li>El trabajo de sellado sólo se debe realizar cuando la temperatura ambiente sea superior a 5°C.</li> <li>Dependiendo del ancho de la fisura se utilizará uno u otro material, tomando las siguientes consideraciones:  <b>Agrietamientos de hasta 6 mm:</b> Se deberá colocar un riego de liga con emulsión asfáltica tipo SC mediante mangueras o las barras del camión distribuidor de asfalto en toda el área. Inmediatamente después de aplicado el asfalto, se esparcirá uniformemente la arena que cumpla con las barandas granulométricas Tipo E, establecidas en la Sección 5.10.2.3 ETG 2-10 Tratamientos bituminosos.  <b>Agrietamientos entre 6 y 20 mm:</b> Se deberá colocar un riego de liga con emulsión asfáltica de curado lento o medio y como sellante asfalto modificado con polímeros y con caucho o sellante elastomérico. Deberá tenerse en cuenta el factor de forma de la fisura; en el caso de asfaltos con polímeros se recomienda un factor de forma mínimo de 1:1 (ancho: profundidad).  <b>Agrietamientos entre 21 y 70 mm:</b> Se colocará un riego de liga con emulsión asfáltica de curado lento o medio y de la mezcla selladora tipo arena-emulsión asfáltica o preferentemente del sellante consistente en asfalto modificado con polímeros y con caucho o sellante elastomérico; deberá aplicarse como se indicó anteriormente o preferiblemente con un equipo ruteador.  <b>Agrietamiento superior a 70 mm:</b> Se colocará un riego de liga con emulsión asfáltica de curado lento o medio y el esparcido y compactación de la mezcla asfáltica en caliente.</li> <li>Hacer limpieza general del sitio de trabajo y los materiales extraídos o sobrantes deberán trasladarse a los depósitos de excedentes autorizados.</li> <li>Al terminar los trabajos, retirar las señales y dispositivos de seguridad en forma inversa a cómo fueron colocados.</li> </ol>					
<b>MEDICIÓN</b>					
Se realizará en metros lineales de fisuras selladas conforme estas especificaciones. Cualquier operación individual que sea necesaria para la ejecución de la actividad, no se medirá para efectos de pago.					

<b>Actividad</b>	Sello asfáltico	<b>Producción promedio</b>	1200 [m <sup>2</sup> /día]	<b>Unidad de medida</b>	[m <sup>2</sup> ]
<b>DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD</b>					
Consiste en aplicar un recubrimiento con riego asfáltico sólo o con agregado fino triturado a pavimentos bituminosos en áreas localizadas, o en tramos que están fisurados por fallas de la capa superior.					
<b>PROPÓSITO</b>					
Lograr obtener una superficie impermeable y resistente al desgaste, protegiendo los agregados que conforman las capas inferiores.					
<b>CRITERIO PARA LA EJECUCIÓN</b>			<b>NIVEL DE MANTENIMIENTO</b>		
Superficie desgastada o con agrietamientos en áreas limitadas por deficiencias de la capa superior.			Sellar la superficie para prevenir la penetración de agua y obtener una superficie adecuada.		
<b>PROCEDIMIENTO</b>					
<p>1. Colocar señales preventivas y dispositivos de seguridad para evitar accidentes con los vehículos.</p> <p>2. El personal debe contar con los uniformes, cascos, chalecos reflectivos y todos los elementos de seguridad industrial de acuerdo con las normas establecidas.</p> <p>3. Identificar las zonas deterioradas y delimitarlas.</p> <p>4. preparar la superficie para aplicar el sello asfáltico haciendo bacheo, si es el caso y efectuar limpieza de la superficie a sellar haciendo un barrido cuidadoso hasta eliminar toda basura, polvo, barro y otros.</p> <p>5. Verificar que las condiciones climáticas sean las adecuadas para la aplicación del material asfáltico, sin lluvias, temperatura atmosférica y de la superficie por sellar.</p> <p>6. Ejecutar los Sellos asfáltico dependiendo del tipo de intervención para cada caso de deterioro:</p> <p><b>Sello con emulsión asfáltica.</b> El riego se debe hacer con distribuidor a presión en que la emulsión, diluida en agua a razón de 1:1, se aplique a razón de 0,5 kg/m<sup>2</sup> a 1,0 kg/m<sup>2</sup>, dependiendo del estado en que se encuentre la superficie por tratar. La dosis mayor se aplicará sobre superficies muy abiertas y oxidadas. La dosis definitiva por aplicar será determinada en terreno. En caso de sellos en superficies pequeñas se podrán utilizar barras regadoras manuales.</p> <p>No se debe transitar sobre el área tratada hasta que la emulsión haya alcanzado la rotura completamente y, en ningún caso, antes de 2 horas. La emulsión asfáltica deberá cumplir lo establecido en la Sección 5.12.1 ETG 2-12 Suministro de cemento asfáltico de las ETG-2010.</p> <p><b>Sello con lechada asfáltica (Slurry seal).</b> La lechada asfáltica es una mezcla de agregado mineral, relleno mineral (filer), emulsión asfáltica, agua y en algunos casos aditivos. La emulsión asfáltica catiónica podrá ser de rompimiento lento (CSS) o rápido (CQS) que cumplan los requerimientos de la Sección 5.12.2 ETG 2-12 Suministro de cemento asfáltico de las ETG-2010. El agregado dependerá del tipo de lechada asfáltica que se haya determinado aplicar en el estudio (Tipo I, II, y III depende del Tamaño Máximo Nominal del agregado).</p> <p>Mediante distribuidor a presión se aplicará, primeramente, un riego de emulsión diluida en agua en porción máxima de 1:4 (emulsión-agua) dependiendo del residuo de la emulsión, y a razón de 0,5 l/m<sup>2</sup> a 0,7 l/m<sup>2</sup> de superficie, dependiendo de la porosidad y sequedad que presente la superficie por tratar. La lechada se deberá diseñar para que la capa resulte de un espesor según el Tamaño Máximo Nominal del agregado. Se deberá hacer mezclas de prueba para verificar consistencia y proporciones.</p> <p><b>Sello con arena-asfalto.</b> Consiste en la aplicación de un material bituminosa sobre la superficie de un pavimento existente, seguida por la extensión y compactación de una capa de arena. Se utilizará emulsión asfáltica de rotura rápida CQS que deberá cumplir con lo requerido en la Sección 5.12.2 ETG 2-12 Suministro de cemento asfáltico de las ETG-2010. El agregado fino deberá ser duro, limpio y de superficie rugosa y angular. El material deberá satisfacer los requisitos de calidad pertinentes indicados en la Sección 5.10.2.1 ETG 2-10 Tratamientos bituminosos de las ETG-2010.</p> <p>La cantidad de material bituminoso y arena dependerá del estado de la superficie a proteger, la intensidad del tráfico y de las condiciones climáticas. Como guía la cantidad oscilará entre 0,5-1,5 l/m<sup>2</sup> de emulsión y 8-12 kg/m<sup>2</sup> de arena. La aplicación del material bituminoso y del agregado deberá realizarse según la Sección 5.10.4 ETG 2-10 Tratamientos bituminosos de las ETG-2010.</p> <p>7. Hacer la limpieza general del sitio de trabajo y los materiales extraídos o sobrantes deberán ser trasladados a los depósitos de excedentes autorizados.</p> <p>8. Al terminar los trabajos, retirar las señales y dispositivos de seguridad en forma inversa a cómo fueron colocados.</p>					
<b>MEDICIÓN</b>					
Se realizará en metros cuadrados de sello asfáltico ejecutado conforme estas especificaciones. Cualquier operación que sea necesaria para la ejecución de la actividad, no se medirá para efectos de pago.					

<b>Actividad</b>	Capa asfáltica de refuerzo	<b>Producción promedio</b>	100 [m <sup>3</sup> /día]	<b>Unidad de medida</b>	[m <sup>3</sup> ]
<b>DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD</b>					
Consiste en la colocación de una sobrecarpeta de mezcla asfáltica en caliente, sobre el pavimento existente, previo tratamiento de los daños puntuales presentes.					
<b>PROPÓSITO</b>					
recuperar las condiciones originales estructurales y superficiales del pavimento, deteriorado por los diferentes agentes que influyen en el comportamiento del pavimento.					
<b>CRITERIO PARA LA EJECUCIÓN</b>			<b>NIVEL DE MANTENIMIENTO</b>		
cuando las condiciones del pavimento aún no han llegado a los límites permisibles de deterioro y el nivel de deterioro impide ejecutar labores de mejoramiento en 1er y/o 2do grado.			recuperar las condiciones estructurales iniciales del pavimento para alcanzar una adecuada circulación vehicular con seguridad, comodidad, y rapidez.		
<b>PROCEDIMIENTO</b>					
Se debe considerar la ejecución de trabajos preliminares tales como:					
<p>-Bacheo asfáltico donde se considere apropiado restablecer las características de soporte del pavimento.</p> <p>-Capa de nivelación superficial para mantener los espesores de la misma capa de rodadura constante.</p> <p>-Fresado de la carpeta de rodadura, cuando se considere necesario por las altas irregularidades de la superficie, que no puedan ser corregidas con la capa de nivelación y/o bacheo.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Colocar señales preventivas y dispositivos de seguridad. Se debe contar con la suficiente señalización para evitar accidentes con los vehículos.</li> <li>2. El personal debe contar con los uniformes, cascos, chalecos reflectivos y todos los elementos de seguridad industrial de acuerdo con las normativas establecidas.</li> <li>3. Identificar las zonas a intervenir y proceder a delimitarlas.</li> <li>4. Preparar la superficie para aplicar el recapado asfáltico bacheo y sellos de fisuras y grietas y efectuar la limpieza de la superficie a recapar haciendo un barrido cuidadoso hasta eliminar toda basura, polvo, barro y otros materiales sueltos. En algunos casos ha de requerirse el fresado de la carpeta asfáltica existente.</li> <li>5. Verificar que las condiciones climáticas de acuerdo a lo establecido en la Sección 5.11 ETG 2-11 Carpetas de concreto asfáltico mezclado en caliente de las ETG-2010.</li> <li>6. Aplicar el riego de la liga en proporciones que podrán variar desde 0,4 a 1,0 l/m<sup>2</sup>. Las características del material, temperatura de aplicación y ejecución deberá cumplir lo establecido en la Sección 5.11.2 ETG-16 Carpeta de concreto asfáltico mezclado en caliente de las ETG-2010.</li> <li>7. Ejecutar la colocación de la carpeta asfáltica de refuerzo con la terminadora autopropulsada y luego compactar la mezcla extendida con cilindro vibratorio, operaciones que deberán ser realizadas de acuerdo con lo establecido en la Sección 5.11.4 ETG-16 Carpeta de concreto asfáltico mezclado en caliente de las ETG-2010.</li> <li>8. Los procedimientos que se utilicen para realizar estos trabajos no deberán afectar, en forma alguna, otras áreas del pavimento, de las bermas y demás elementos de la vía no incluidas en el trabajo.</li> <li>9. Hacer la limpieza general del sitio de trabajo y los materiales extraídos o sobrantes deberán trasladarse a los depósitos de excedentes autorizados por la Supervisión.</li> <li>10. Al terminar los trabajos, retirar las señales y dispositivos de seguridad en forma inversa a cómo fueron colocados.</li> </ol>					
<b>MEDICIÓN</b>					
Se realizará en metros cuadrados de capa asfáltica de refuerzo ejecutado conforme estas especificaciones. Cualquier operación individual que sea necesaria para la ejecución de la actividad, no se medirá para efectos de pago.					

**CAPÍTULO V**

**CONCLUSIONES Y**

**RECOMENDACIONES**

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

Las conclusiones de la investigación son las siguientes:

- Se cumplió con el análisis el estado actual de la plataforma del tramo Tomatitas–Erquis Norte, logrando establecer las acciones de mantenimiento y rehabilitación necesarias que ayudaran a mantener en un estado óptimo la vía analizada.
- Se describió los conceptos y principios de los pavimentos flexibles en carreteras según normas vigentes en nuestro país, siendo el aporte teórico decisivo para el desarrollo de la investigación.
- Se aplicó la metodología PCI para caracterizar las patologías halladas en el tramo de estudio, el mismo tiene como resultado final 77, valor que pertenece, según la escala del método al intervalo 85–70, por lo tanto, se puede calificar la condición del tramo como “Muy bueno”, el pavimento en cuestión se encuentra en condiciones óptimas de circulación.
- Se determinó la capacidad de soporte que posee el pavimento, empleando la Viga Benkelman. La deflexión característica calculada es de  $20,95 \times 10^{-2}$  mm y la deflexión admisible  $92 \times 10^{-2}$  mm, lo que indica que la vía como una estructura tiene una capacidad remanente a la deflexión significativa, por lo tanto, posee un comportamiento adecuado al tiempo de operación.

El radio de curvatura promedio obtenido de los ensayos con la Viga Benkelman fue de 596 m y según el condicionamiento estructural de la CONREVIAl el radio de curvatura mínimo debe ser de 100 m, por tanto, podemos indicar que el comportamiento del pavimento es bueno.

- Se pudo realizar una planificación de los trabajos de mantenimiento necesarios en la vía aplicando el software HDM-4, donde se pudo simular la evolución del deterioro del pavimento en un periodo de análisis de 15 años según los estándares de mantenimiento y criterios de intervención propuestos.

- Los estándares y criterios de intervención dependerán mucho de la entidad encargada de realizar los trabajos de mantenimiento, en la presente investigación se trató de apegarse lo más posible a nuestra realidad, teniendo en cuenta que se trata de una carretera perteneciente a la Red Municipal.
- Finalmente, los gastos para todo el periodo de análisis y para cada tipo de estándar son los siguientes: ejecutando únicamente mantenimientos de tipo rutinario (bacheo y sellado de fisuras cada año) 805615,89 Bs, aplicando además del mantenimiento rutinario un mantenimiento periódico que consiste en un sello asfáltico que dará inicio cuando el área total de la calzada esté fisurada en un 10-15%, costará 5151843,98 Bs, finalmente el costo de los trabajos de rehabilitación que consiste en la colocación de una capa de refuerzo o sobrecarpeta más los dos estándares anteriores será de 14788438,65 Bs, este estándar se hará efectivo cuando el IRI sea mayor o igual a 5 m/km y el área dañada total sea mayor al 15%, teniendo como efecto la devolución de las propiedades superficiales y estructurales iniciales del pavimento.

## **5.2. Recomendaciones**

- Se recomienda a la entidad encargada del mantenimiento de carreteras en nuestro medio, pueda elaborar un banco de datos donde quede inventariada de manera periódica la información sobre las condiciones superficiales y estructurales de una carretera o una red de carreteras.
- Con una recolección sistematizada de la información cuantitativa del estado de una vía se podrá fijar umbrales de intervención y planificar los trabajos de mantenimiento primordiales según los recursos disponibles.
- Se recomienda realizar trabajos de mantenimiento rutinario destinados a lograr que la infraestructura vial preserve la condición superficial, funcional, estructural y de seguridad requerida, a efectos de asegurar la satisfacción de los usuarios y en general atender de manera adecuada el tráfico.
- La actividad bacheo de calzada y berma se recomienda ejecutarla lo más antes posible en la progresiva 0+000 hasta 0+250, donde se observaron muchas fallas de

este tipo, producto de acometidas que no se rellenaron y compactaron de manera adecuada.

- Si bien los resultados de la auscultación del tramo Tomatitas–Erquis Norte señalan que se encuentra en buenas condiciones, lo que se pretende en el proyecto final es prever el deterioro del pavimento, es por ello que se recomienda a la institución encargada del mantenimiento de carreteras en nuestro medio, que se deben tomar acciones tan pronto el pavimento muestre los primeros síntomas de daño.
- El Sello asfáltico que se propuso en la planificación del mantenimiento, si bien no serán un aporte estructural, son sistemas de tratamiento muy versátiles y económicos que proporciona una superficie duradera, rellena huecos y sella fisuras; de esta manera no solo se alarga la vida útil del pavimento sino también se evitan pagos elevados de dinero por concepto de mantenimientos correctivos o la rehabilitación del tramo.
- Las labores de mantenimiento descritos deberán ser desarrollados conforme las Especificaciones Técnicas presentadas en el capítulo anterior, de esta manera se garantizará la correcta ejecución de estos trabajos.