

**ANALISIS DEL CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

**AUTOR: ING. CARLOS ALBERTO MARTÍNEZ ALARCÓN**

**TUTOR: ING. JAVIER CAMACHO TAUTA.**

**PROGRAMA DE ESPECIALIZACION EN INGENIERIA DE PAVIMENTOS**

**FACULTA DE INGENIERIA CIVIL**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA**

**2015**



# ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

## LIFE CYCLE ANALYSIS OF ASPHALT PAVEMENTS

Carlos Alberto Martínez Alarcón  
Ingeniero Civil  
Estudiante Postgrado Ingeniería de Pavimentos  
Universidad Militar Nueva Granada  
Bogotá, Colombia  
[carlos.martinez595@gmail.com](mailto:carlos.martinez595@gmail.com)

**Fecha de recepción:** 02 de Diciembre de 2015  
**Fecha de aprobación:** 02 de Diciembre de 2015

### RESUMEN

En los últimos años, cada vez es mayor el número de viajeros y de carga que se mueve por las vías del país, creando la necesidad de brindar mayor comodidad y seguridad a los viajeros, lo que implica la utilización de metodologías que permitan analizar desde el punto de vista administrativo y de costos cual será la mejor opción de rehabilitación o de mejoramiento de las vías de Colombia, desde la corrección de defectos superficiales hasta la reconstrucción de la vía para recuperar la capacidad estructural de esta. El análisis del ciclo de vida de los pavimentos es una herramienta metodológica que facilita a la institución vial escoger la estrategia técnico económico que proveerá el comportamiento deseado del pavimento al menor costo en el período bajo estudio. Para evitar el deterioro de los pavimentos se deben establecer procedimientos de administración vial capaces de generar un completo control en cuanto a mantenimiento y rehabilitación. Lo ideal sería no realizar actividades de rehabilitación sino actividades previas de supervisión para ejecutar un mantenimiento preventivo que garantice el buen estado del pavimento.

### ABSTRACT

In recent years, it is increasing the number of passengers and freight moving on the country's roads, creating the need to provide greater comfort and safety to passengers, which involves the use of methodologies to analyze from the Administratively cost and what is the best option of rehabilitation or improvement of means of Colombia, from the correction of surface defects to the reconstruction of

the road to retrieve the structural capacity of this. The life cycle analysis of pavements is a methodological tool that enables to choose the financial institution vial technical strategy that will provide the desired pavement performance at the lowest cost in the period under study. To prevent deterioration of pavements should establish procedures for road management can generate complete control in terms of maintenance and rehabilitation. Ideally no rehabilitation activities but previous monitoring activities to perform preventive maintenance to ensure the condition of the pavement.

## **INTRODUCCIÓN**

Las actividades de mantenimiento y rehabilitación de las estructuras de pavimento se van haciendo cada vez más importantes, a medida que ellas se deterioran con el tiempo y con el tránsito. El énfasis en la administración de pavimentos es la preservación de la inversión inicial mediante la aplicación oportuna de tratamientos adecuados de mantenimiento y rehabilitación para prolongar la vida del pavimento.

La importancia de fomentar la conservación y el mejoramiento de la red vial resulta de la necesidad que tienen las autoridades y la sociedad de impulsar el crecimiento y el desarrollo de las diferentes localidades del país. Al contar con mejores vías de comunicación, las regiones, localidades, municipios, departamentos, etc., tendrán mayores posibilidades para integrarse a los mercados, favoreciendo sus ventajas comparativas, lo que contribuirá a fortalecer su productividad y aumentar su capacidad de desarrollo.

Se debe mencionar que las vías son una condición necesaria para el desarrollo económico y social de una región o nación, ya que sirven de enlace en el intercambio de bienes y personas, así como de la cultura, dando con ello origen a las relaciones de producción y a las relaciones sociales necesarias para el progreso.

Al existir una adecuada red vial, la distancia entre las regiones y localidades se reduce, generándose una disminución en el costo del transporte. En consecuencia, habrá mejor competencia regional y local. Lo anterior, necesariamente debe ir ligado a un adecuado sistema de Administración Vial, logrando optimizar los recursos que se invierten para este tipo de proyectos, así como la eficiencia y funcionalidad de las vías.

El mantenimiento y la rehabilitación de un pavimento cubren un rango muy amplio de actuaciones, que varían desde la simple corrección de defectos superficiales para mejorar la calidad de la circulación vehicular, hasta las operaciones de reconstrucción, destinadas a recuperar totalmente la capacidad estructural de la calzada. [1]

Con el fin de mitigar las problemáticas expuestas anteriormente, según Posada y

Pradena [2], se encuentra en la actualidad un software desarrollado por el Banco mundial conocido como Highway Design and Maintenance Standards Model (HDM-4), el cual se viene usando desde hace más de dos décadas y sirve como herramienta para el análisis, planificación, gestión y evaluación de inversiones para la conservación y mejora de carreteras.

De igual manera según Henao [3], el modelo permite identificar el estado de una vía, o tramo de ella, al estar sometida a un determinado uso, según las condiciones prevalecientes y esperadas de la misma en cuanto a su geometría, tráfico, ambiente, entre otras, lográndose con esto la evaluación de tipo técnico; simultáneamente se puede considerar el aspecto económico al tener presentes los costos de los insumos para los vehículos y los costos de las actividades de construcción y mantenimiento de la vía. Adicionalmente, en un proyecto vial se hace necesario considerar diferentes alternativas tanto de construcción, si se trata de un proyecto nuevo, como de mantenimiento posterior para el mismo caso o el de vías existentes a las que se pretenden recuperar o dar condiciones adecuadas de transitabilidad para los usuarios.

## **1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

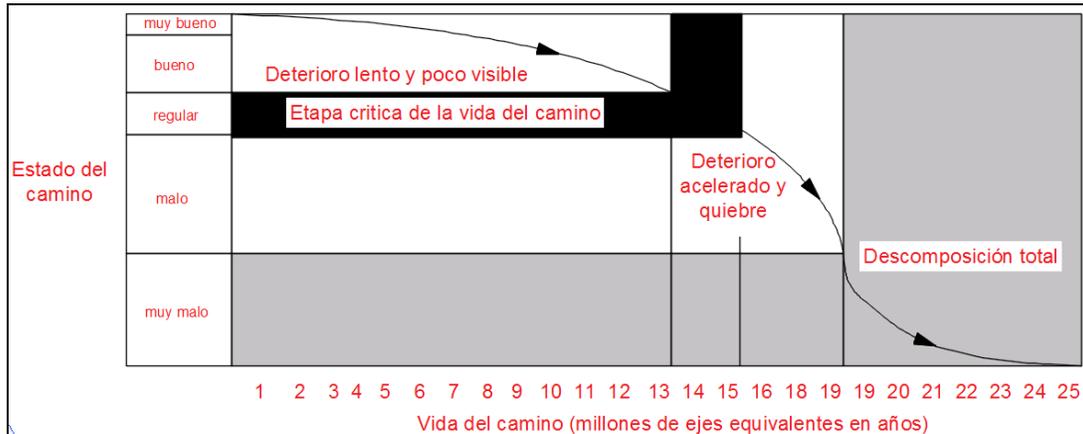
### **1.1 CONSERVACIÓN DE LOS PAVIMENTOS**

Los pavimentos tienen como propósito prestar un servicio al tránsito en forma segura, confortable y eficiente, por tal motivo es muy importante realizar labores de conservación adecuadas y oportunas sobre ellos. El concepto de conservación de pavimentos significa la acción de cuidar que su servicio se prolongue durante el tiempo requerido, lo cual implica un esfuerzo de preocupación de los encargados y un desembolso de recursos importante por parte de la agencia responsable.

El patrimonio vial del país se ha enriquecido considerablemente y sigue creciendo en una progresión importante, con ello se pone de manifiesto la necesidad de disponer de una completa información del estado de vías y estructuras, así como de un plan de acción de conservación que permita la prevención y corrección de deterioros oportunamente. Con este objetivo se utilizan los sistemas de gestión, que sirven de herramienta para ayudar a la decisión, seccionando las acciones más adecuadas, determinando su costo y fijando sus prioridades, dentro de las disponibilidades económicas de la entidad administradora, sea esta pública o privada. [4]

Se entiende por gestión de pavimentos todas aquellas acciones de conservación que aplicadas en el tiempo mantienen un nivel de servicio adecuado, tanto en el aspecto funcional como estructural. En la Figura 1 se presenta un gráfico que representa la forma general en que se deterioran los pavimentos, en él se puede observar que en los primeros años el deterioro es lento; sin embargo, existe un

umbral en el cual el deterioro es acelerado, llegando rápidamente el término de la vida útil del camino.



**Figura 1.** Esquema de deterioro de un pavimento a través del tiempo

**Fuente:** Adaptado de [7]

## 1.2 CAUSAS DEL DETERIORO DE LOS PAVIMENTOS

El deterioro tiene diversos orígenes y produce imperfecciones, las cuales afectan desfavorablemente la comodidad, la seguridad y los costos de operación de los usuarios de las carreteras [5]. Todo proceso de mantenimiento o rehabilitación busca corregir, según el caso, estas alternativas, de manera que se conserve o recupere el índice de servicio durante un lapso determinado que compense apropiadamente las inversiones realizadas para tal fin. Principales causas de los deterioros prematuros de los pavimentos:

1. Deficiencias de diseño.
2. Deficiencias constructivas.
3. Incrementos imprevistos en el tránsito vehicular.
4. Factores ambientales desfavorables.
5. Agotamiento del periodo de diseño.

## 1.3 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLE

La evaluación estructural de pavimentos asfálticos consiste, básicamente, en la determinación de la capacidad portante del sistema pavimento-subrasante en una estructura vial existente, en cualquier momento de su vida de servicio, para establecer y cuantificar las necesidades de rehabilitación, cuando el pavimento se acerca al fin de su vida útil o cuando el pavimento va a cambiar su función. Las necesidades de evaluar estructuralmente los pavimentos de una red aumentan a medida que se completa el diseño y la construcción de una red vial nacional o regional y consecuentemente aumenta la necesidad de su preservación y rehabilitación.

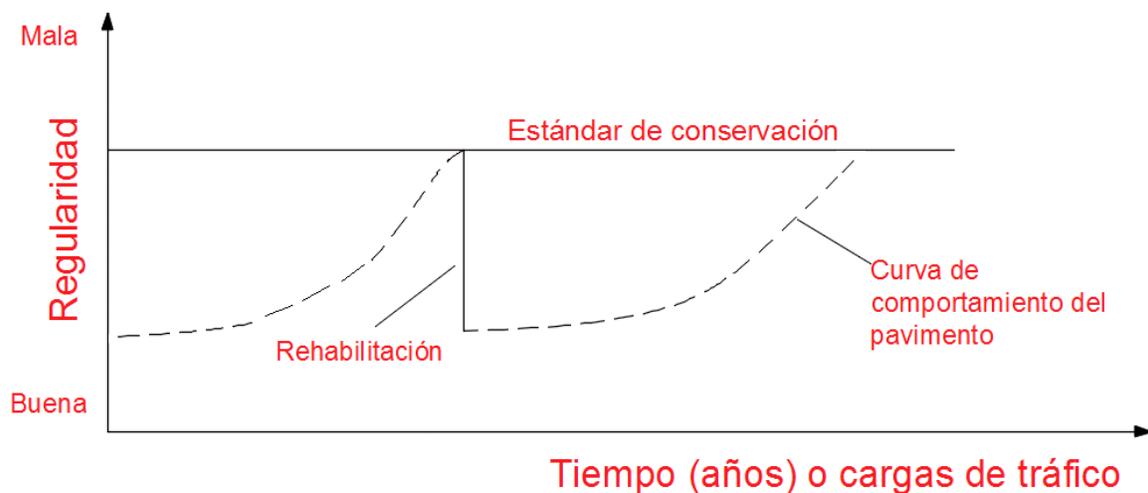
Ante un problema de evaluación estructural, el ingeniero vial tradicionalmente ha recurrido a la perforación, a la toma de muestras para su ensayo en el laboratorio, y al análisis de cada uno de sus componentes (materiales) por separado, para incorporarlos luego en el sistema (pavimento) y deducir acerca de las características estructurales del mismo. Esta metodología es cara, lenta, altera el equilibrio del sistema al perforar y es "destruktiva".

La alternativa presentada en este estudio es "no destructiva", a través de la Viga Benkelman y se basa en la interpretación de las deflexiones medidas en la superficie de un pavimento. Las deflexiones en la superficie de un pavimento reflejan una respuesta global del sistema pavimento-subrasante bajo una carga dada. Su medición es simple, rápida, económica y "no destructiva", es decir, no se alteran el equilibrio ni la integridad del sistema.

La metodología no destructiva se fundamenta en que la forma y dimensión de la curva de deflexiones encierran una valiosa información acerca de las características estructurales del pavimento y su subrasante. Para interpretar esta información en forma cuantitativa, se compara al pavimento-subrasante reales con un modelo matemático utilizando las deflexiones medidas para determinar los parámetros estructurales del sistema. Una vez determinados, estos parámetros estructurales, puede usarse como insumo para establecer las necesidades de refuerzo. Podría decirse entonces que la metodología de evaluación estructural, por métodos no destructivos, es un proceso de diseño inverso ya que utiliza la respuesta del sistema para establecer sus características estructurales, lo cual es generalmente opuesto a un proceso de diseño.

#### **1.4 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA**

En la Figura 2 se ilustran las tendencias conocidas en el rendimiento de pavimentos, representadas por la calidad de la carpeta de rodadura, la calidad suele ser medida en términos del Índice de Rugosidad Internacional (IRI). Cuando se define un patrón de conservación (fisuras, desprendimiento de áridos, baches, etc.), se impone un límite de deterioro al que es permisible que llegue el pavimento. Como consecuencia, además de los costos de capital de la construcción de carreteras, los costos totales en que incurren los organismos implicados dependerán de los estándares de conservación y mejora aplicados a las redes de carreteras.



**Figura 2.** Concepto del Análisis del Ciclo de Vida en HDM-4  
**Fuente:** Adaptado de [10]

## 2. NORMATIVIDAD Y ESPECIFICACIONES EN COLOMBIA

El INVIAS, es la entidad encargada de elaborar y publicar las normas y manuales técnicos de aplicación en la ingeniería nacional, dentro de estos manuales y publicaciones el INVIAS presenta la “Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras”, la cual fue elaborada en el 2002 y actualizada en el 2008 de acuerdo a las condiciones del tránsito, sistemas constructivos, empleo de sistemas no destructivos de evaluación del pavimentos y las nuevas tecnologías de materiales en la construcción. Esta guía está conformada por 8 partes las cuales son:

- Parte 1. Introducción.
- Parte 2. Recolección de información.
- Parte 3. Evaluación de la condición global del pavimento.
- Parte 4. Selección de técnicas de rehabilitación.
- Parte 5. Guías para la formación de estrategias de rehabilitación.
- Parte 6. Análisis económico.
- Parte 7. Guías para la elección de la estrategia de rehabilitación.
- Parte 8. Construcción y seguimiento.

Esta guía está enfocada primordialmente para dar el buen servicio a un pavimento para así mismo poder brindarle al usuario mayor seguridad, comodidad y economía. Para la rehabilitación de un pavimento, se entiende rehabilitación como un mejoramiento funcional y estructural del pavimento que da lugar a la extensión de la vida de servicio [6].

Como parámetro de la presente guía es que es aplicable únicamente a los pavimentos asfálticos flexibles, semi-flexibles y semi-rígidos.

Para la evaluación de los deterioros del pavimento debemos hacer una clasificación y cuantificación de estos ya que esto nos ayuda a tener un juicio más apropiado sobre la condición del pavimento. Existen varios tipos de deterioros, los cuales los podemos discriminar en 3 factores que son: tipo, los cuales dependen de los mecanismos que lo originan; gravedad, representa la severidad del deterioro en términos de su progresión y la extensión la cual se refiera a la proporción del tramo evaluando que es afectado por los tipos de deterioros.

Una vez evaluados los factores anteriormente mencionados debemos entrar a realizar la selección de las técnicas de rehabilitación donde identificamos los tratamientos que mejor se ajusten a la corrección de los defectos existentes y a su vez lograr el mejoramiento deseado en cuanto a la capacidad estructural, funcional y drenaje del pavimento.

Una de las alternativas que plantea la presente guía es la “4R” que significa: Restauración, Refuerzo, Reciclado y Reconstrucción. Las alternativas de rehabilitación de un pavimento como lo son las de restauración y refuerzo requieren un tratamiento con el fin de garantizar su comportamiento a mediano o largo plazo. En cuanto al sellado de fisuras el tratamiento que aplica para este es la limpieza de este y la aplicación de un producto bituminoso sellante puede ser frío o caliente dependiendo de la apertura de las mismas.

El parcheo y bacheo consiste en la intervención de áreas localizadas para corregir defectos relacionados con un deterioro estructural o problemas de humedad.

En cuanto al reciclado consiste en la reutilización luego de cierto tratamiento de un material de pavimento que haya cumplido su finalidad inicial y es empleado para una nueva capa.

Escogida la estrategia de rehabilitación la cual se puede combinar se deben realizar los diseños de ellas. Adicionalmente se debe considerar la metodología ASSHTO-93, la cual es de raíces empíricas y de uso corriente en el país, en el cual se basan los manuales de diseño del INVIAS para todos los niveles de volúmenes de tránsito. La metodología AASHTO presenta la ventaja de no requerir el conocimiento del tránsito que ha circulado sobre el pavimento existente, parámetro que es indispensable para efectuar los análisis racionales.

Pasando al plano económico se realiza la evaluación para determinar la factibilidad para elegir entre las distintas estrategias de un proyecto. En este análisis se evalúan todos los costos o flujos de dinero asociados a cada estrategia propuesta a lo largo de la vida útil. De esta manera la evaluación económica ayuda a elegir la estrategia de inversión que se considere más adecuada para los intereses institucionales y dependiendo del punto de vista de la entidad encargada de realizar la inversión puede ser privada o pública.

La evaluación privada es la que busca conocer el retorno o rendimiento que generara un proyecto con base en el capital a invertir. En este caso se comparan

los costos y los flujos de ingresos que afectan exclusivamente a un proyecto, desde el punto del inversor privado. Como es el caso de las carreteras en concesión, en las cuales la atención se centra en optimizar los costos de inversión para lograr las condiciones mínimas exigidas de la vía y en maximizar los ingresos por el cobro de peaje, por ejemplo.

En relación al sector público considera los costos y beneficios como un proyecto que se tiene para la sociedad. Se denomina, también, evaluación social o evaluación socio-económica y se aplica por las entidades de gobierno o públicas que realizan la inversión y cuyo interés es maximizar el beneficio público con la realización del proyecto vial.

El análisis de costos durante el ciclo de vida (ACCV) es una herramienta metodológica que facilita a la institución vial escoger la estrategia técnico económico que proveerá el comportamiento deseado del pavimento al menor costo en el período bajo estudio. Para cada estrategia técnica se consideran los costos de rehabilitación y de mantenimiento y los costos para los usuarios. Esto permite realizar la comparación económica de las diferentes estrategias factibles, evaluadas a lo largo del mismo lapso de análisis. Una estrategia factible es aquella que cumple las necesidades técnicas del proyecto y se ajusta a las restricciones de toda índole que la pueden afectar.

El ACCV (Análisis del costo del ciclo de vida) es una herramienta en el proceso de decisión, pero no determina la misma. Aspectos tales como las restricciones presupuestales y ambientales, el concepto de la comunidad y el buen juicio ingenieril, también deberán ser considerados en el momento de elegir la mejor estrategia para un proyecto en particular.

### **3. IMPORTANCIA DEL DESARROLLO, MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN DE LA RED VIAL**

Con el propósito de satisfacer las necesidades de transporte de carga y pasajeros a lo largo y ancho del país, los colombianos han implementado diversos modos (terrestre, acuático, aéreo) desde hace mucho tiempo, en función de las modalidades de desarrollo y de la configuración del relieve. La infraestructura actual de transporte consiste fundamentalmente de carreteras y tuberías, con orientación principal norte – sur, influenciada por la presencia de la Cordillera de los Andes. Los ferrocarriles privados para el transporte de carbón, también conforman un grupo representativo dentro del sistema.

En la actual condición de transición hacia una economía de mercado, que implica una mayor movilidad de personas y bienes, el transporte carretero constituye un elemento vital para el crecimiento y el desarrollo de la sociedad colombiana.

A pesar del estancamiento que ha habido durante los últimos años, esta evolución ha causado un impacto indeseable sobre la infraestructura de carretera, pues ha

estado acompañada de incrementos en los tamaños de los vehículos y en las magnitudes de las cargas circulantes, mientras el Estado ha sido incapaz de generar los recursos necesarios para mantener y reforzar los pavimentos de manera que alcancen la solidez estructural requerida para soportar la realidad de este continuo incremento de la agresividad del tránsito.

#### **4. MODELOS DE COMPORTAMIENTO DE PAVIMENTOS**

En el marco de la administración de pavimentos y al fin de predecir el deterioro que pueda sufrir dichos pavimentos a lo largo de su vida útil se utilizan distintos tipos de modelos de comportamientos. Estos modelos por lo general corresponden a expresiones matemáticas que permiten predecir la posible evolución del estado del pavimento en el tiempo, en base al conocimiento de las condiciones del mismo al momento de ponerlo en servicio y al momento de la realización del análisis; además permiten pronosticar los efectos, a corto y largo plazo, de la mantención efectuada sobre ellos, con el objetivo de realizar estimaciones razonables tanto en las oportunidades en que sea necesario llevar a cabo alguna conservación, como del nivel de deterioro resultante luego de la misma y su progresión en el tiempo [7].

Los modelos de deterioro pueden surgir a partir de desarrollos empíricos y/o mecanicistas. Los desarrollos empíricos tienen su origen en bases de datos reales conformadas a partir de pavimentos existentes, en dichas bases de datos se ha registrado gran cantidad de información referida a diversos aspectos entre los que se cuentan: información general de los pavimentos, datos de diseño (materiales, diseño estructural, diseño de juntas, etc.), características del drenaje y de las bermas, datos de tránsito, de condiciones climáticas y de deterioro a lo largo de su vida útil. Luego de determinar las variables más relevantes en la formación de cada deterioro, se realiza con ellas un análisis estadístico que da origen al modelo que percibe el comportamiento futuro del pavimento, con base en una ecuación que relaciona las variables seleccionadas, en ciertos casos de modelo generado puede tener la desventaja de ser aplicables a pavimentos en condiciones diferentes de aquellas en la que ese tomaron los datos.

Por otra parte, el desarrollo de modelos mecanicistas se basa no sólo en datos de pavimentos existentes, sino que particularmente en características del comportamiento de las diversas capas y materiales que conforman los pavimentos, específicamente en las propiedades físicas y mecánicas de la sub base, la base granular o estabilizada y el pavimento propiamente tal, sea este rígido o flexible (de concreto o asfalto). Por ejemplo: un modelo de agrietamiento se basa en la determinación del nivel de fatiga acumulado en las losas, el que para ser calculado requiere la utilización de conceptos mecanicistas que permitan conocer las tensiones y deformaciones críticas generadas en función de las cargas de tránsito y del alabeo térmico.

#### 4.1 MODELOS DE DETERIORO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS (HDM-III)

Para el desarrollo de los modelos de HDM III se adoptó un sistema que combina métodos empíricos avanzados con principios mecanicistas. La metodología utilizada fue fundamentalmente empírica, de manera que se desarrollaron modelos paramétricos utilizando técnicas de regresión estadística de la información proveniente de series de tiempo; información que habría sido coleccionada en una base de datos satisfactoriamente diseñada, a partir de pavimentos en servicio bajo diferentes condiciones de estructura y tránsito. Por otra parte, la forma funcional y los parámetros de los modelos se basaron, en la medida de lo posible, en teorías mecanicistas y en el conocimiento experimental del comportamiento estructural de los pavimentos y de los materiales que lo conforman.

Esta forma de modelación presenta un problema debido a que la evolución del deterioro de los pavimentos es generalmente lenta y los cambios observados en la condición de los pavimentos son usualmente pequeños y muy sensibles a los errores de mediación. Además, muchos efectos son estadísticamente colineales (aumentan simultáneamente), como es el caso del tiempo y el tránsito acumulado, volumen de tránsito y edad, cargas de tránsito y resistencia estructural, por lo que se hace difícil distinguir claramente las causas del deterioro [8].

Además, existe una debilidad en el enfoque empírico de usar correlaciones estadísticas para establecer la relación entre el deterioro del pavimento, como una variable dependiente, y las características del pavimento, tránsito y medio ambiente, como variables independientes; esta debilidad radica en que el resultado obtenido sólo es un reflejo de la situación local, no necesariamente identifica la verdadera relación fundamental entre las variables.

Con el objeto de evitar, o al menos minimizar, los inconvenientes antes descritos, se aplicaron las siguientes técnicas de estimación a los datos en serie de tiempo de las diferentes secciones de pavimentos:

- a) Regresión lineal basada en la estimación de coeficientes mediante mínimos cuadrados.
- b) Regresión lineal de la transformación logarítmica de los parámetros, con corrección para la media logarítmica.
- c) Regresión lineal de la transformación logarítmica de los parámetros (funciones de forma sigmoidea)
- d) Regresión no lineal basada en mínimos cuadrados de los residuales.
- e) Modelación probabilística del tiempo de falla para el inicio del deterioro usando estimación de máxima verosimilitud (con una variante del método de Newton Raphson para la maximación), y distribución de Weibull de los tiempos de falla.
- f) Reducción de los datos de deterioro dentro de cada subsección individual a un incremento agregado del deterioro a lo largo del periodo de estudio, a fin de disminuir la varianza debida a los errores de mediación y mejorar la discriminación estadística de los efectos esperados de cada parámetro.

- g) Uso del tiempo como la base para la predicción incremental del deterioro, asumiendo como variable explicativa tanto el volumen y las cargas de tránsito, como la edad del pavimento desde su construcción o último recarpeteo estructural.

En suma, para dar forma a los modelos y seleccionar los métodos analíticos que se deben utilizar y a fin de conformar los mejores modelos incrementales de predicción, se conjugaron las fortalezas de los dos métodos existentes para desarrollo de los modelos: el método mecanicista, en su perspectiva tanto teórica como experimental, y el método empírico. [9]

Como se indicó, la gran mayoría de modelos de HDM III son incrementales, pero hubo uno en particular que no pudo ser desarrollado (como los otros) directamente del análisis estadístico de los datos con que se contaba, este es el modelo de ahuellamiento. Lo anterior se produjo debido a que en los intervalos de tiempo no era satisfactorio, entonces se realizaron estimaciones con base en los valores absolutos de deterioro, generando un modelo agregado de ahuellamiento [10]. Para lograr darle forma incremental a este modelo agregado de ahuellamiento se utilizó un medio alternativo que consistió en diferenciar en función del tiempo el modelo agregado obtenido para conseguir así el incremento correspondiente, con el cual es posible originar un modelo incremental con la siguiente forma:

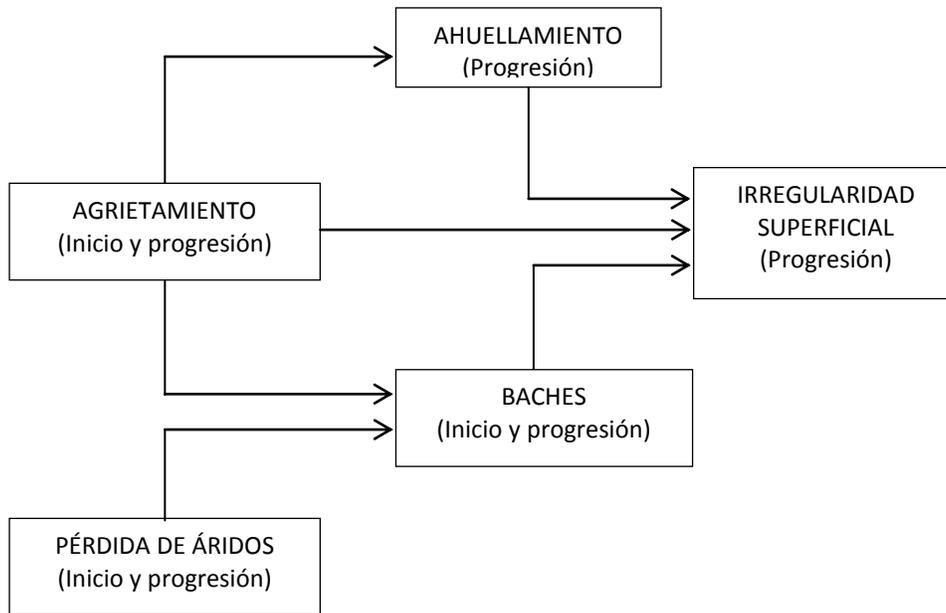
$$Deterioro_n = Deterioro_{n-1} + \text{mas incremento del deterioro (1)}$$

La base de datos utilizada en el desarrollo de los modelos HDM III perteneció a un estudio de caminos de Brasil, desarrollado entre los años 1976 y 1982 y para evaluar la validez de los modelos desarrollados, se utilizaron otras bases de datos provenientes de diferentes regiones y climas (Kenia, Túnez, Sudáfrica, Arizona, Illinois, Texas, etc.).

Los modelos de deterioro incrementales de pavimentos asfálticos cuyo comportamiento se modeló en HDM III fueron básicamente los que siguen:

- Agrietamiento: en función de su extensión (como % del área superficial influenciada), severidad (de acuerdo al ancho de la grieta) y tipo (patrón visual de las grietas existentes).
- Pérdida de áridos: en función de su extensión (de manera análoga a las grietas)
- Baches: de acuerdo a su extensión (igual de las grietas) y volumen de baches abiertos por kilómetros de pista.
- Ahuellamiento: en función del promedio y la desviación estándar de la profundidad de la huella en la pista.
- Rugosidad: en términos de un perfil superficial estadístico del camino relacionado con la respuesta de los vehículos en movimiento.

La relación entre los modelos se presenta en la figura 3.



**Figura 3.** Interacción entre los distintos modelos de deterioro para predecir la progresión de la irregularidad superficial en HDM-III.

**Fuente:** Adaptado de [7]

Los modelos de deterioro incrementales de HDM III presentan dos formas claramente diferenciadas, estas son:

1. Modelos de dos fases: son aquellos que están caracterizados por dos fases separadas en el deterioro, una de iniciación y otra de progresión, corresponden a esta clasificación los modelos de agrietamiento, pérdida de áridos y baches.
2. Modelos de una fase: son los modelos de progresión continua del deterioro, de esta variedad son los modelos de ahuellamiento y rugosidad.

En HDM III no se formularon nuevos modelos a partir del análisis estadístico de datos para la segunda fase de deterioro de los pavimentos asfálticos, excepto aquellos propuestos para calcular el incremento en la rugosidad luego de aplicadas ciertas mantenciones, en el resto de los deterioros se siguen utilizando los mismos modelos de primera fase, cambiando en ellos los valores de aquellos parámetros que se ven afectados por cada actividad de mantención, por ejemplo: se cuenta la edad desde cero nuevamente, se cambia el número estructural. [11]

Además, para reflejar el impacto que se produce sobre los parámetros sobre los modelos inmediatamente después de la mantención se utilizan relaciones basadas en la experiencia práctica y el conocimiento que hay del comportamiento de los pavimentos asfálticos.

En HDM III las intervenciones se clasificaron en seis categorías primarias, de acuerdo al momento en que se piensa aplicar y a cuál es su nivel de impacto sobre el estado del pavimento. Las categorías de intervención son las siguientes:

- Mantenimiento rutinario
- Bacheo
- Tratamiento preventivo
- Resellado
- Recapado
- Reconstrucción

La forma que toman los modelos de deterioro luego de la aplicación de las mantenciones antes descritas se dan a conocer a continuación:

- a) Las relaciones para predecir el efecto del parchado han sido formuladas con base en la experiencia práctica, sólo el modelo de cambio en la rugosidad se ha basado en el análisis estadístico.
- b) Para el tratamiento preventivo no hay disponibles relaciones estadísticamente determinadas, por lo que se han incorporado relaciones tentativas basadas en una evaluación ingenieril de la experiencia con tratamientos similares en distintos países.
- c) En el caso del resellado se generó un nuevo modelo para calcular el incremento de la rugosidad, para los demás deterioros se continúan aplicando los modelos de primera fase, pero realizando una actualización a los valores de número estructural, deflexión promedio y áreas de agrietamiento previo después del resellado. Para la actualización de valores se utilizan relaciones basadas en la lógica y la experiencia de comportamientos de diversos pavimentos.
- d) Los efectos del recapado en el deterioro del pavimento provocan la reclasificación del tipo de superficie en estudio (que cambia de características debido al recapado), lo que induce a utilizar las relaciones de primera fase que correspondían al nuevo tipo de superficie para calcular las progresiones de los deterioros. Además se comienza nuevamente a contar la edad y ejes equivalentes sobre ese pavimento y se realiza una actualización de los valores del número estructural, la deflexión promedio y las áreas de agrietamiento previo después del recapado. También debe consignarse el efecto inmediato del recapado sobre los deterioros, que consiste en una disminución a cero de los agrietamientos, pérdida de áridos y baches. Solo en el caso de la rugosidad se generó un nuevo modelo a partir de análisis estadísticos para calcular su incremento.

#### **4.2 EVALUACIÓN ECONÓMICA EN HDM**

Esta evaluación se basa en un programa computacional desarrollado por el Banco Mundial en conjunto con un grupo de países, que desarrollaron modelos de predicción para distintos tipos de deterioro y superficies de pavimentos. Esta

herramienta tiene la característica de poder manejar tanto datos técnicos como económicos modelando los deterioros y recomendando acciones de conservación con sus respectivos costos e inversiones a lo largo de la vida útil del proyecto [12].

De esta manera se agiliza enormemente la evaluación de proyectos de infraestructura y permite reducir la incertidumbre con respecto al comportamiento del pavimento. Así las agencias encargadas pueden optimizar sus recursos elevando el nivel de servicio de la infraestructura y disminuyendo los costos.

A diferencia del HDM-III, el HDM-4 permitirá realizar evaluaciones tanto en pavimentos de hormigón como de asfalto, con lo que el campo de aplicación del programa es mucho mayor. Con ello se pueden comparar proyectos de distintas características junto con realizar los respectivos análisis de sensibilidad.

El proceso de modelación con el software HDM-4 requiere definir las características y condiciones bajo las cuales se pretenden realizar los mantenimientos, se deben plantear diferentes alternativas según las necesidades del proyecto a realizar. Según Arboleda [13], en los módulos manejadores de datos es donde se realizan las adaptaciones y configuraciones de algunos componentes y parámetros de las condiciones del corredor vial que se va a estudiar (Red de carreteras, flota vehicular, estándares de trabajo y configuración). Dentro de las herramientas de análisis se encuentran los módulos de proyectos, programas y estrategias los cuales operan sobre los datos. Por otro lado, los modelos definen los componentes y parámetros predeterminados que se usarán en las aplicaciones:

1. Modelos de deterioro, y efectos de las obras (RDWE por las siglas Road Deterioration and Works Effects)

El desarrollo de estos modelos permite predecir, para un periodo de análisis definido por el usuario, la evolución del estado físico de las vías en función de las consideraciones de tránsito, climatológicas, y de tipo de pavimentos interpuestas. De igual manera, los modelos permiten estimar los posibles efectos de las obras de conservación y mejoramiento más usuales. El HDM-4 incorpora modelos para distintos tipos de pavimentos (Flexibles y Rígidos).

2. Modelos de efectos para los usuarios (RUE por las siglas Road User Effects).

Son utilizados para calcular los efectos del estado físico y las condiciones de operación de las carreteras sobre los usuarios de las mismas, en términos de indicadores como los costos de operación vehicular y los tiempos de recorrido. A su vez, se emplean para obtener los beneficios derivados de las inversiones en proyectos carreteros.

3. Modelos de seguridad, energía y efectos ambientales (SEE por las siglas Safety, Energy and Environmental Effects)

Grupo de modelos destinados a determinar los efectos de la condición de los pavimentos en aspectos como la tasa de accidentalidad, consumo de energía asociado con la operación del tránsito, equipo de construcción, y la emisión de contaminantes.

## **5. CONCLUSIONES**

Las estrategias de mantenimiento y rehabilitación de las estructuras del pavimento son de vital importancia a lo largo de su vida útil ya que éstas se van deteriorando con el tiempo y con el aumento gradual del tránsito. El objeto de la administración de pavimentos, es la preservación de la inversión inicial mediante la aplicación oportuna de tratamientos adecuados de mantenimiento y rehabilitación para prolongar la existencia del mismo.

La administración de pavimentos es una herramienta que se emplea para fijar estrategias que se utilizan para decidir políticas de restauración y rehabilitación de pavimentos flexibles. Dentro de las estrategias de administración de rehabilitación se debe tener en cuenta el estado del pavimento, costo inicial, costos anuales de mantenimiento, seguridad, restricciones físicas, ambientales y económicas, así como costos de funcionamiento.

El software HDM-4 permite realizar un análisis técnico y económico considerando el ciclo de vida de una vía, determinando costos y beneficios durante este periodo.

Es necesario señalar, que la ineficiencia en el mantenimiento vial en Colombia ha sido más que un asunto institucional, un asunto de política gubernamental. En épocas de austeridad, cuando los recortes son inevitables, las restricciones en las inversiones de capital fijo son justificables, pero la reducción en los gastos de mantenimiento no es más que un ahorro ficticio que en un plazo muy breve debe ser compensado con inversiones cuantiosas en rehabilitación, cuando no en reconstrucción.

Por otra parte, en el instante de tomar decisiones relativas a la inversión pública en infraestructura vial, los responsables dan siempre prioridad a las ventajas políticas que brinda la construcción de obras majestuosas y visibles, así sean carentes de rentabilidad para la comunidad, ignorando por completo los efectos más allá del futuro inmediato

Para evitar el deterioro de los pavimentos se deben establecer procedimientos de administración vial capaces de generar un completo control en cuanto a mantenimiento y rehabilitación. Para realizar dichos procesos se deben establecer estrategias que permiten identificar el problema, establecer el estado de la vía y consecuentemente proponer el tipo de tratamiento requerido. Lo ideal sería que no se realizaran actividades de rehabilitación, sino que a través de actividades previas de supervisión, se ejecutara un mantenimiento preventivo que garantice el buen estado de los pavimentos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Guía Metodológica para el diseño de Obras de Rehabilitación, De pavimentos Asfálticos de Carreteras, (INVIAS).
- [2] Posada, Pradena M.M, (2007) Análisis de Inversiones en Carreteras Utilizando Software HDM-4), En: Revista de la Construcción, vol. 6, núm. 1, 2007, pp. 35-47.
- [3] Henao, J.J, HDM-4 Guía Básica para su uso (Trabajo de Grado). (2003) Facultad de minas, Universidad Nacional de Colombia. 86p.
- [4] De Solminihac, Hernán (1998) Gestión de Infraestructura Vial.
- [5] Guía Metodológica para el Diseño de obras de Rehabilitación de Pavimentos Asfálticos para carreteras, INVIAS
- [6] Instituto Nacional de Vías. Documentos técnicos, Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras.
- [7] Gestión de Infraestructura Vial, 3ª edición, Hernán de Solminihac T.
- [8] Salgado T. Mauricio. Principios y Fundamentos de la Gestión de Pavimentos Curso Internacional Conservación de Carreteras, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia.
- [9] Gestión de la calidad: conceptos, enfoques, modelos y sistemas. Cesar Camison, Sonia Cruz y Tomás González.
- [10] Henao, J.J,. HDM-4 Guía Básica para su uso (Trabajo de Grado). (2003) Facultad de minas, Universidad Nacional de Colombia. 86p.
- [10] Metodología para la recolección y entrega de datos de inventario y diagnóstico para la actualización de la base de datos de inventario de malla vial y espacio público, Versión 1.1. Instituto de Desarrollo Urbano – IDU. 28 Enero-2006.
- [11] Henry G. R. Kerall, (2001) Highway Development y Management. Versión General de HDM-4. Association mondiale de la route.
- [12] Arboleda, G,. (2003) Desarrollo y Gestión de carreteras (Highway Development & Management) HDM-4. AC Editores. 218p.