

ANÁLISIS DE LAS CURVAS DE DETERIORO OBTENIDAS CON HDM-4 Y MICRO PAVER PARA UNA SECCIÓN DE ESTUDIO EN LA AUTOPISTA MÉXICO-QUERÉTARO.

NOÉ HERNÁNDEZ FERNÁNDEZ & JORGE ALARCÓN IBARRA
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

noe.hdz@hotmail.com,
jorge.alarcon.ibarra@hotmail.com

RESUMEN

El presente estudio analiza la aplicación de dos modelos de predicción para una sección de estudio ubicada en la Autopista México – Querétaro, una de las carreteras más importantes de México, también una de las más transitadas. Los modelos aplicados son el Micro PAVER y el HDM-4.

Para aplicar el modelo del Micro PAVER es necesario calcular el Índice de Condición del Pavimento, obtenido de los inventarios de deterioros, para el HDM-4 es necesario incorporar información a los modelos de deterioros, esta información se obtuvo de los indicadores evaluados, posteriormente se realizó la calibración de los modelos de deterioro para garantizar una mayor precisión en la predicción de la condición.

Una vez aplicados los sistemas, se llevó a cabo una comparación de los resultados obtenidos con cada uno de los modelos de predicción para un periodo de 15 años. En el caso del Micro PAVER se observó que durante el periodo de análisis el pavimento se encuentra en una condición buena, por arriba del PCI crítico, valor adoptado para calificar el estado del pavimento. Para el HDM-4, se observó que en un periodo corto de tiempo el valor máximo de IRI establecido era superado, colocando la condición del pavimento en un estado deficiente.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas tres décadas, el mantenimiento y rehabilitación de carreteras han llegado a ser el mayor problema que tienen que afrontar las agencias a cargo de su administración alrededor del mundo. Este problema se ve agravado por la falta de recursos suficientes para mejorar la condición de las redes carreteras. Para superar este problema, muchas agencias comenzaron a establecer prácticas y procedimientos alternos para conservar sus redes. Estas prácticas suelen ser limitadas por muchos factores, como la cantidad de personal, la financiación y la falta de experiencia.

En un sentido amplio, la gestión de pavimentos es una disciplina que engloba todas las actividades involucradas en la planeación, diseño, construcción, evaluación y conservación de los pavimentos de una red de carreteras. Se puede definir a los Sistemas de Gestión de Pavimentos (PMS), como “un conjunto de herramientas o métodos que ayudan a los tomadores de decisiones en la búsqueda de estrategias óptimas para proporcionar, evaluar y mantener los pavimentos en buen estado durante un determinado periodo de tiempo [1].

Un sistema de gestión moderno debe proveer mecanismos para predecir la evolución en el tiempo del estado físico de la infraestructura o de sus problemas operativos, a fin de

permitir a los analistas la estimación de las necesidades futuras de conservación y mejoramiento y con ello, la aplicación de un enfoque racional de gestión basado en procesos formales de planeación y programación. Estos mecanismos son necesarios, también, para evaluar el mérito técnico de alternativas de proyecto o de estrategias generales de preservación y desarrollo en función del desempeño futuro de los caminos asociado con cada una de ellas, reforzando así las capacidades de los sistemas de gestión como herramientas de planeación y programación.

Los modelos de predicción del deterioro en los pavimentos son un componente esencial en la gestión a nivel de red y proyecto. Los modelos de predicción son usados a nivel de red para la optimización del presupuesto al realizar el análisis de los costos del ciclo de vida y para determinar las necesidades de recolectar datos para evaluar el estado actual de la red. A nivel de proyecto, los modelos se utilizan para diseñar los pavimentos, realizando el análisis de los costos del ciclo de vida, determinar el mejor tiempo para realizar el mantenimiento y seleccionando la medida óptima de mantenimiento o rehabilitación.

2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Los objetivos del estudio son:

- Aplicar dos modelos de predicción de desempeño en una sección de estudio
- Analizar las curvas de deterioro obtenidas con cada uno de ellos y
- Comparar los resultados que arrojan durante un periodo establecido planteando diferentes escenarios para evaluar las capacidades de los modelos

Para cumplir los objetivos planteados el estudio se dividió en dos partes, en la primera se realizaron las pruebas de campo en la sección analizada y la recopilación de la información; la segunda consistió en la aplicación de los modelos y la predicción del deterioro. En este artículo solo se comentara la segunda etapa que involucra el estudio.

3. MODELOS DE PREDICCIÓN DE DESEMPEÑO ANALIZADOS

Un pavimento es una estructura bastante compleja con respecto a la predicción de su desempeño futuro, ya que depende de la interacción de una serie de factores (tráfico, clima, procedimientos constructivos, condiciones del drenaje, estructura del pavimento, materiales de construcción y políticas de mantenimiento adoptadas) y su cuantificación es muy difícil [2]. A continuación se describirá de forma breve los modelos de predicción analizados en el estudio.

3.1. Micro PAVER

El primer enfoque de tecnología de pavimentos usado en el desarrollo de PAVER fue la creación del Índice de Condición del Pavimento (PCI, por las siglas Pavement Condition Index). El cual se utiliza para la predicción del desempeño del pavimento, la estimación del presupuesto y otras funciones de los PMS. Una característica importante del PCI es que debe de ser reproducible. También debe de proporcionar una medida significativa de las necesidades de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción (MR&R) y aceptables niveles de servicio al usuario. El PCI fue desarrollado específicamente para el sistema PAVER para cumplir los objetivos mencionados. Se basa en las medidas del tipo de

deterioro, severidad y cantidad. El PCI se ha desarrollado para indicar la integridad general de una estructura de pavimento y la condición operacional de la superficie [3].

También está directamente relacionado con la cantidad de mantenimiento y reparación necesaria, ya que se basa en la cuantificación del deterioro del pavimento. El PCI tomó tres años en desarrollarse y su éxito representa un hito importante en el desarrollo del PAVER. De hecho, el PCI puede considerarse la base del sistema PAVER. Es un índice numérico con valores que van de cero (falla total) a 100 (excelente). El cálculo del PCI se basa en los resultados de un levantamiento de las condiciones de forma visual en el que se identifican los tipos de deterioro, severidad y cantidad.

Una cuestión igualmente importante en el desarrollo del PAVER es el desarrollo de los modelos de predicción de la condición. Durante la etapa de desarrollo sus creadores investigaron diferentes técnicas para desarrollar los modelos de predicción en las que se incluyeron la experiencia, el análisis de regresión de la condición con respecto a variables como la edad y el tráfico, el análisis mecanicista puro y una combinación de todo lo anterior. Debido al fracaso observado con las técnicas anteriores se decidió que se crearía una técnica de modelación en el sistema en lugar de desarrollar o adaptar un modelo específico. La técnica de modelación resultante se denomina Análisis de Familia. Esta técnica permite al usuario identificar pavimentos con características de desempeño similares y luego desarrollar una curva de cuarto grado usando el error de los mínimos cuadrados entre el PCI y la edad del pavimento.

3.2. HDM-4

El sistema para el desarrollo y gestión de carreteras (Highway Development and Management System), conocido por las siglas HDM-4, originalmente desarrollado por el Banco Mundial para uso internacional, es una herramienta para el tratamiento sistemático de las cuestiones relacionadas con la gestión de carreteras. El HDM-4 puede proporcionar la predicción del desempeño de las carreteras, programación de tratamientos, estimación de los fondos, asignación del presupuesto, evaluación de proyectos, estudios de impacto de las políticas y una amplia gama de aplicaciones especiales. Sin embargo, su eficacia depende de su capacidad de modelar con precisión y predecir el desempeño del pavimento.

La rugosidad del pavimento, expresada en términos del Índice Internacional de Rugosidad (IRI por las siglas International Roughness Index), constituye un elemento central en el uso del HDM-4 para evaluar inversiones en proyectos carreteros. El concepto de rugosidad se refiere a las imperfecciones de la superficie del camino que inciden en la velocidad, costos de operación vehicular, seguridad vial y la comodidad de los usuarios al circular por las carreteras, así como en su percepción con respecto al nivel de servicio ofrecido por las mismas. La rugosidad afecta directamente la dinámica vehicular, incrementando el desgaste de las llantas y los componentes mecánicos de los vehículos, además de un impacto considerable en el consumo de combustible.

La importancia del IRI como estándar internacional para la medición de la rugosidad, aunada al papel que este concepto juega en la percepción de los usuarios con respecto al nivel de servicio de las carreteras, motivaron en primera instancia la elección del índice como principal resultado de referencia para evaluar los modelos de deterioro para pavimentos asfálticos del HDM-4.

Las relaciones de los Modelos de deterioro y efectos de las obras (RDWE por las siglas Road Deterioration and Works Effects) se desarrollaron a partir de estudios de

desempeño a largo plazo llevados cabo principalmente en Brasil y verificados ampliamente en estudios de campo independientes de varios países diferentes. De los estudios realizados se elaboraron una serie de modelos matemáticos (llamados modelos de deterioro), que eran capaces de predecir el tiempo de iniciación y el nivel de progresión de diversos tipos de deterioro que presentan comúnmente los pavimentos. A estos modelos se les otorgó la capacidad de que fueran generales, es decir, que se pudieran aplicar en cualquier región del planeta, previa a una calibración. Esta consiste en la evaluación de ciertos parámetros en base a las características del clima y a los procesos constructivos del lugar dónde se quisieran implementar los modelos.

4. SECCIÓN DE ESTUDIO

La autopista México-Querétaro es una de las carreteras más transitadas de México, además de que es una vía de gran importancia que comunica la zona Centro-Sur con el Norte del país, a través de dos ejes troncales: México-Nuevo Laredo y Querétaro-Cd. Juárez. El tramo comprendido entre la ciudad de México y Querétaro es el que mayor volumen vehicular presenta y actualmente con la apertura del Arco Norte de la Cd. de México se ha incrementado sustancialmente, sobre todo en la circulación de vehículos pesados. En la figura 1 se observa la localización de la sección de estudio.



Figura 1. Localización de la sección de estudio.

La sección en estudio forma parte de la autopista México-Querétaro, iniciando en el kilómetro 132+800 y finaliza en el 147+915 en la caseta de Palmillas, con una longitud de 15.15 km y cuenta con tres carriles de circulación en cada sentido. Se seleccionó esta sección ya que se cuenta con información de la evolución del estado del pavimento desde su reconstrucción en el año 2005 hasta el año 2010. Según la información recopilada del proyecto de reconstrucción la estructura actual se diseñó para un periodo de vida de 15 años, con un Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) de 28, 098 de proyecto con una tasa de crecimiento de 4%. Los trabajos consistieron en fresar y recuperar 210 mm de espesor del pavimento existente, este material fue colocado como subrasante en las ampliaciones, posteriormente se fresaron 300 mm para conformar la base estabilizada, a este material se le agregó material con calidad de base en un 30 % del PVSS del material fresado y para estabilizarlo se mezcló con un 9 % de cemento Portland para formar una capa estabilizada de 400 mm. Después se colocó una capa de mezcla asfáltica densa con espesor de 100 mm y una capa de rodadura de 40 mm de espesor.

5. METODOLOGÍA DE APLICACIÓN DE LOS MODELOS

Cada uno de los sistemas analizados requiere de parámetros distintos para su aplicación, sin embargo, en los dos sistemas es necesario incorporar información de la red carretera y de las secciones a analizar.

Para propósitos de tener un mayor número de datos y minimizar la dispersión de la información, se analizó por separado cada sentido de circulación, identificándolos como cuerpo 1 y cuerpo 2; los carril de cada cuerpo también fueron analizados por separado y se identificaron del número 1 al 3. Por último, los carriles se dividieron en subtramos de 5.0 km de longitud, de acuerdo a sus características de alineamiento horizontal y vertical, estos fueron identificados con los números 01 al 03, resultando en 18 subtramos; para realizar la identificación de los subtramos se empleó un código en donde el primer número identifica el subtramo, el segundo número el carril y por último el tercero el cuerpo. Por ejemplo, el código 01_1-1 se refiere al subtramo 01, del carril 1 y el cuerpo 1. En la figura 2 se observa el diagrama planteado para subdividir la sección de estudio.

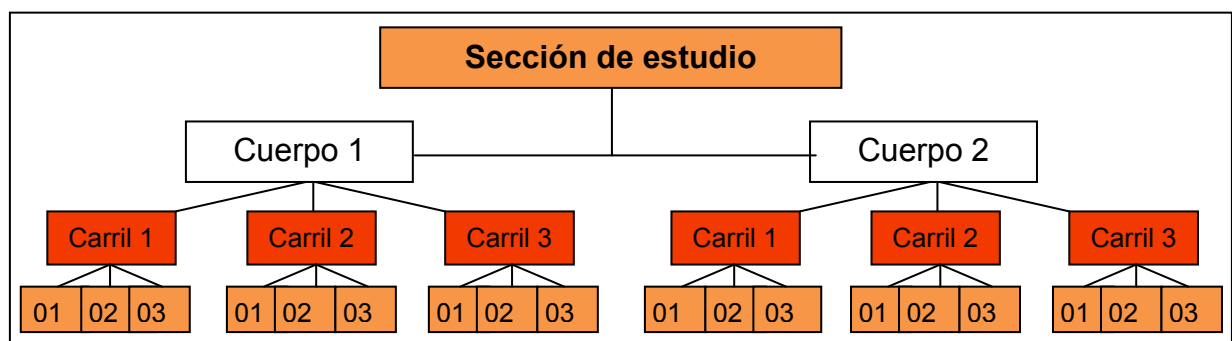


Figura 2. Subdivisión de la sección de estudio.

5.1. Aplicación del modelo Micro PAVER

Dentro de las tareas necesarias para aplicar el modelo Micro PAVER se incluyen; definir la red de pavimentos, los ramales, las secciones, medir la condición del pavimento, predicción de la condición y las gestiones a nivel de red y proyecto. En este apartado nos enfocaremos en describir el procedimiento para medir y predecir la condición del pavimento.

5.1.1 Medición de la condición del pavimento

El cálculo del PCI, se fundamenta en los resultados de un inventario visual de la condición del pavimento en el cual se establecen CLASE, SEVERIDAD y CANTIDAD que cada daño presenta. Los procedimientos para realizar la medición de la condición se presentan con detalle en la referencia [5].

En primer lugar se divide la sección a analizar en unidades de muestra. Una unidad de muestra es una parte apropiadamente definida de una sección de pavimento designada solamente para propósitos de inspección del pavimento. Se divide la vía en secciones o "unidades de muestreo", cuyas dimensiones varían de acuerdo con los tipos de vía y de superficie. En nuestro caso los subtramos se dividieron en 80 unidades de muestra con una área de 231.35 m² para cada una de ellas.

Posteriormente se determinan las unidades de muestra a evaluar, esta etapa es importante debido a que, la inspección de cada unidad de muestra en un pavimento

requiere un considerable esfuerzo y tiempo, especialmente para secciones de gran tamaño. Con la creación de un plan de muestreo, se minimiza la cantidad de recursos necesarios, sin comprometer la precisión en la estimación del PCI. De las 80 unidades de muestra para cada subtramo, se calculó que solo era necesario inspeccionar 13, de acuerdo al plan de muestreo.

Una vez que el número de unidades de muestra a inspeccionar se haya determinado, el siguiente paso es calcular el intervalo de separación de las unidades. Se recomienda espaciar las unidades utilizando un método sistemático de muestreo aleatorio, cuando las muestras están igualmente espaciadas en toda la sección y la primera se selecciona al azar.

El paso siguiente es definir las condiciones para realizar la inspección, ya que el procedimiento empleado para llevar a cabo una inspección de la condición del PCI variará dependiendo del tipo de superficie que se esté inspeccionando. Es necesario tener en cuenta los datos específicos sobre los procedimientos de inspección. En la referencia [5] se describen los procedimientos para realizar la inspección y se definen los deterioros a evaluar

La tarea final para efectuar la medida de la condición del pavimento es calcular el PCI. El cual se basa en la deducción de valores o factores de peso de 0 a 100 que indican el impacto para cada deterioro en la condición del pavimento. Un valor de deducción de 0 indica que el deterioro no tiene efecto sobre el desempeño del pavimento, mientras que un valor de 100 representa un deterioro extremadamente grave. En este estudio se utilizó el Micro PAVER para calcular el PCI de las unidades de muestra y posteriormente calcular el valor de cada sección evaluada. En la tabla 1 se muestra un resumen de los valores del PCI obtenidos para la sección de estudio. El promedio ponderado del PCI, para la sección de estudio de la autopista México – Querétaro es de 95.61 para el año 2010.

Tabla 1. Valores de PCI calculados con Micro PAVER.

CUERPO 1		CUERPO 2	
Subtramo	PCI	Subtramo	PCI
01_1-1	100.00	01_1-2	100.00
02_1-1	100.00	02_1-2	98.00
03_1-1	100.00	03_1-2	95.00
01_2-1	99.00	01_2-2	99.00
02_2-1	96.00	02_2-2	94.00
03_2-1	96.00	03_2-2	75.00
01_3-1	97.00	01_3-2	99.00
02_3-1	94.00	02_3-2	95.00
03_3-1	98.00	03_3-2	86.00

5.1.2 Predicción de la condición del pavimento

Un extenso programa de investigación llevado a cabo en el Laboratorio de Investigación en Ingeniería de Construcción del Ejército de los EE.UU. (CERL, por sus siglas en inglés) dio como resultado el desarrollo de lo que hoy en día se conoce como Método de Familias [6]. El método consiste en los siguientes pasos.

La primera tarea para predecir la condición es definir la familia del pavimento. Micro PAVER la define como un grupo de secciones de pavimento con características similares de deterioro. El sistema permite definir una familia basándose en varios factores

incluyendo el uso, rango, tipo de superficie, zona, categoría de la sección, fecha de la última reconstrucción y PCI. En la sección de estudio de la carretera México – Querétaro, la familia fue definida en función del tipo de superficie, clasificación de la vía y fecha de la última reconstrucción y fue identificada como “MEX-057”.

El siguiente paso consiste en hacer un filtrado de datos (establecer límites), Micro PAVER permite filtrar los puntos de los datos sospechosos, mediante la definición de un límite máximo y mínimo que se espera durante la vida útil del pavimento analizado. Si un registro está fuera de los límites de la envolvente, el registro es excluido del modelo desarrollado. En la figura 3, se observa el proceso descrito anteriormente para la familia MEX-057.

Posterior al filtrado de datos se realiza un análisis de valores atípicos. El examen detenido de los datos estadísticos para la eliminación de los puntos extremos se realiza en el análisis de los valores atípicos. Este paso es importante porque pavimentos con un desempeño inusual pueden tener un impacto significativo en la forma de la familia que se esté modelando. Micro PAVER calcula los residuos de la predicción, que son las diferencias entre los valores del PCI observado y el estimado utilizando un polinomio restringido de la curva de los mínimos cuadrados. El propósito de obtener los residuos es tener una distribución de frecuencia normal [6], lo que permite tener un intervalo de confianza que será fijado. Por ejemplo, un intervalo de tres desviaciones estándar en ambos sentidos contiene 99.8 % de los PCI observados. Micro PAVER permite especificar el intervalo de confianza, para nuestro caso se adoptó un valor del 95 %. Las secciones que se detectan con valores atípicos basados en los intervalos de confianza, se muestran en la figura 3 y son excluidos del desarrollo del modelo.

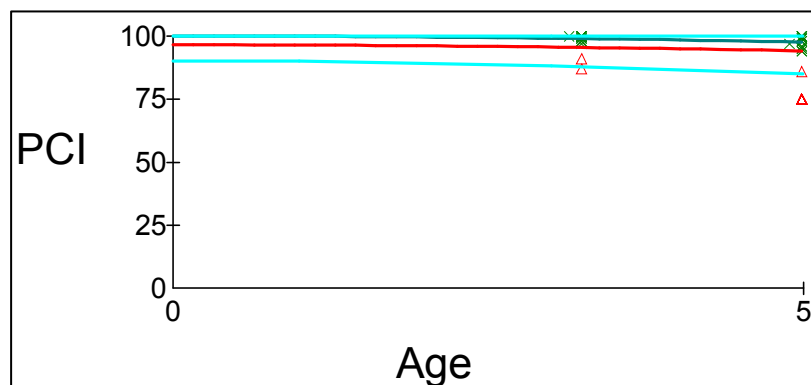


Figura 3. Datos fuera del modelo en el proceso de filtrado y valores atípicos.

Para el desarrollo del modelo de la familia un polinomio restringido de errores mínimos cuadrados se crea a partir de los datos, después de su procesamiento a través del filtrado y análisis de valores atípicos. Este modelo es restringido, ya que no se le permite tener una pendiente positiva debido a que el PCI no puede aumentar con la edad. Si se desea se puede realizar un mejor ajuste sin restricciones para observar si se detecta una pendiente positiva del PCI vs la edad. Esta es una característica útil, ya que puede tratarse de una familia no homogénea. También ayuda a detectar de forma visual donde se está produciendo el problema. Esta curva de mejor ajuste en el análisis de la familia se extiende solo hasta el punto donde los datos se encuentran disponibles. Para predecir las condiciones futuras, la curva se extrapola al extender una tangente de la misma pendiente que la de la curva en los últimos datos registrados.

Una vez realizadas las tareas anteriores se puede llevar a cabo la predicción de la condición. El modelo de predicción de la familia del pavimento se utiliza para predecir el nivel del PCI en la sección. El modelo de predicción en un pavimento en función de una familia representa la media del comportamiento de todas las secciones de esa familia. La predicción de cada sección se hace mediante la definición de su posición respecto a la curva de predicción de la familia. Se supone que el deterioro de todas las secciones del pavimento en una familia es similar y está en función de su estado actual, independientemente de su edad. Una curva de predicción de la sección pasa a través del último punto de PCI/edad para la sección del pavimento que es investigada, paralela a la curva de predicción de la familia.

Al comparar el deterioro de la sección con el deterioro de la familia se proporciona información valiosa sobre los efectos de mantenimiento, tráfico, drenaje y otros factores que intervienen en el comportamiento del pavimento. Este tipo de retroalimentación es invaluable como una guía para la revisión de los procedimientos de diseño de los espesores del pavimento. El método de las familias fue desarrollado para que a medida de que más y más datos se incorporen en la base de datos, el modelo de deterioro se actualice continuamente.

5.2. Aplicación del modelo HDM-4

Para llevar a cabo la aplicación del modelo HDM-4 en la sección de estudio, con todos los parámetros requeridos por el sistema se consumiría mucho tiempo, haciendo el estudio poco práctico, por lo que, tomando como base el estudio realizado por Solorio, Hernández y Gómez [7] solo se alimentó al sistema con la información necesaria para cumplir con los objetivos del estudio, las etapas en las que se dividió este proceso se describen a continuación.

5.2.1 Información para aplicar el sistema HDM-4

Dentro de esta etapa se alimentó al programa con la información requerida para definir la red de carreteras a analizar (por ejemplo definición, geometría, etc.), para nuestro caso la red se definió como “**MEX- 057**”.

El siguiente paso es definir e introducir al sistema la información necesaria para aplicar los modelos de predicción, de acuerdo con Solorio, Hernández y Gómez [7] las principales características que influyen en la precisión de los modelos del HDM-4 están relacionadas con la información de la estructura del pavimento, el tráfico y las condiciones climáticas. En la tabla 2 se presenta un resumen de las características mencionadas anteriormente, con las clasificaciones empleadas por el HDM-4.

Tabla 2. Parámetros incorporados al HDM-4.

Parámetro	Clasificación	Descripción
Tipo de estructura	AMSB	Mezcla asfáltica sobre base estabilizada
Características climáticas	Tropical semiárido	De acuerdo a la precipitación anual y los rangos de temperatura
TDPA (veh/día)	36, 646	Tráfico diario promedio anual

Los datos del tráfico se obtuvieron de los datos viales publicados por la Dirección General de Servicios Técnicos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Los cuales fueron registrados en las casetas de cobro de Palmillas, en el km 147+917. Con relación a las características físicas de los vehículos, se empleó la información de la referencia [8]. Para el resto de los parámetros que intervienen en los modelos de deterioro, se

asumieron los valores por omisión propuestos por el HDM-4, verificando que fueran compatibles con los objetivos del estudio.

5.2.2 Calibración de los modelos de deterioro

Durante esta etapa se llevó a cabo la calibración de los modelos de deterioro de carreteras (RD por las siglas Road Deterioration). Este proceso es importante ya que una vez lograda la calibración se estará garantizando una mayor precisión en la predicción del desempeño de la sección de estudio.

Para calibrar un determinado modelo de comportamiento de pavimentos es necesario contar con un conjunto de datos de deterioro que permitan reconstruir la curva de su comportamiento real, por lo que es conveniente que estos datos pertenezcan a un período más o menos prolongado de tiempo. La calibración, consiste entonces en encontrar factores (K_i) que logren el mejor ajuste entre las predicciones del modelo y los datos medidos en campo [9]. Los modelos de deterioro calibrados en este estudio corresponden a los modelos de agrietamiento, profundidad de rodera y rugosidad. En la tabla 3 se resume la información disponible para llevar a cabo este proceso.

Tabla 3. Información de los indicadores para la calibración de los modelos.

Indicador	IRI	Rodera	Resistencia al deslizamiento	Macrotextura	Inventario de deterioros	Capacidad estructural
Año	2005-2010	2005-2010	2008 y 2010	2008 y 2010	2008 y 2010	2008 y 2010

Para llevar a cabo el proceso de calibración de los modelos fue adaptada la metodología desarrollada por Austroads, descrita en la referencia [10]. A grandes rasgos, esta metodología involucra dos pasos, los cuales son mencionados a continuación.

5.2.2.1 Ajuste de la tasa de progresión del deterioro

A pesar de que se cuenta con información de las campañas anuales de monitoreo de los indicadores de IRI y rodera, por un periodo de 6 años (2005-2010) estos datos presentan una dispersión notable ya que en la mayoría de los subtramos no se presenta una clara tasa de progresión del indicador, sin efectuarse una acción de mantenimiento mayor en el pavimento. Debido a esta situación y para propósitos de calibrar los modelos, es necesario definir una tasa de progresión del deterioro, los siguientes puntos resumen el proceso llevado a cabo para definir la tasa de progresión.

- Los datos que son definidos como “validos” son identificados de forma que presenten una tendencia definida de progresión de la tasa de deterioro.
- Las estimaciones se basan en un mínimo absoluto de tres puntos de datos “validos”, aunque cuatro puntos son más confiables.
- Se debe de efectuar un análisis posterior para identificar los datos que son “aceptables” dentro la tendencia definida en primera instancia, estos datos pueden ser incluidos con los datos validos para definir una nueva tendencia, los datos identificados como “atípicos” en la nueva tendencia no serán considerados para el análisis.

5.2.2.2 Calibración de los factores (K_i) de los modelos

El procedimiento adoptado para la calibración es definido como “prueba y error”. El proceso para realizar la calibración de los factores consistió en calcular la tasa de progresión del deterioro predicha con el HDM-4 para cada subtramo, para posteriormente

comprarla con la tasa de progresión de deterioro ajustada. Después se modifican los factores de calibración de los modelos RD y se repite el paso anterior. Este proceso continua hasta que la tasa de deterioro predicha se aproxima a la tasa de deterioro ajustada. A continuación se hace una breve descripción de los tipos de modelos calibrados.

El HDM-4 considera dos tipos de agrietamientos, el estructural y el térmico. Solo el primer tipo fue considerado, debido a las condiciones climáticas de la zona. Respecto al agrietamiento estructural, los modelos RD lo dividen en agrietamiento “total” y agrietamiento “ancho” (> 3 mm), solo el agrietamiento total fue calibrado para la sección de estudio, ya que es el que se manifiesta en el pavimento de acuerdo a lo observado en los inventarios de deterioros realizados.

Los modelos de agrietamiento total tienen dos factores de calibración, uno para ajustar el inicio del agrietamiento (K_{cia}) y otro para ajustar la progresión del agrietamiento (K_{cpa}). Ya que solo se cuenta con poca información de este tipo de deterioro, la calibración se realizó modificando los dos factores hasta observar que la tasa de progresión correspondía al agrietamiento observado en el año 2010, ya que este año se realizó el último inventario de deterioros.

El modelo de profundidad de rodera se basa en la suma de cuatro componentes densificación inicial, deformación estructural, deformación plástica y uso de llantas con aditamentos. La densificación inicial se relaciona con las capas granulares, debido a que el pavimento analizado cuenta con una capa estabilizada con un espesor importante este no es considerado en el estudio. El uso de llantas con aditamentos solo se presenta en climas fríos y tampoco aplica para el estudio.

Los modelos calibrados en el estudio son deformación estructural con su respectivo factor de calibración (K_{rst}) y el modelo de deformación plástica con el factor de calibración (K_{rpd}). El primero es considerado debido a la influencia que este componente tiene en la estimación de la profundidad de rodera final cuando se tienen bases estabilizadas, sobre todo con la presencia de agrietamiento. El modelo de deformación plástica es considerado solo para las capas asfálticas, en nuestro caso el espesor de este tipo de capas es considerable, por lo que, se tiene que tomar en cuenta este tipo de componente para la estimación de la profundidad de rodera total. En la figura 4.a se observa la variación de la progresión de la rodera antes y después de calibrar el modelo de predicción para este tipo de deterioro.

La progresión de la rugosidad se predice en el HDM-4 como la suma de cinco componentes; estructural, agrietamiento, rodera, baches y efectos climáticos. La rugosidad se calcula al final de cada año, teniendo en cuenta el cambio en la condición de cada modo de deterioro secuencialmente por cada año en un periodo de análisis. El incremento anual total del cambio en la rugosidad es la suma de estos componentes.

En la referencia [11] se recomienda que por lo general solo el factor K_{gm} se utilice para ajustar las predicciones de la rugosidad en el HDM-4 a las condiciones locales. Sin embargo, durante el proceso de calibración se encontró que era necesario modificar los factores K_{gr} para hacer coincidir la tasa de progresión ajustada con la estimada. En algunos casos específicos también fue necesario modificar los factores K_{gs} y K_{gc} . Las tasas de progresión de la rugosidad antes y después de la calibración se observan en la figura 4.b. En la tabla 4 se presentan los promedios de los factores calibrados para la sección de estudio por tipo de deterioro.

Tabla 4. Promedios de los factores de calibración por tipo de modelo.

Tipo de Modelo	Agrietamiento		Rodera		Rugosidad	
Factor e calibración	K_{cia}	K_{cpa}	K_{rst}	K_{rpd}	K_{gm}	K_{gr}
Valor de defecto	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	1.0
Valor de calibración (promedio)	0.06	0.23	1.04	0.28	1.59	1.47

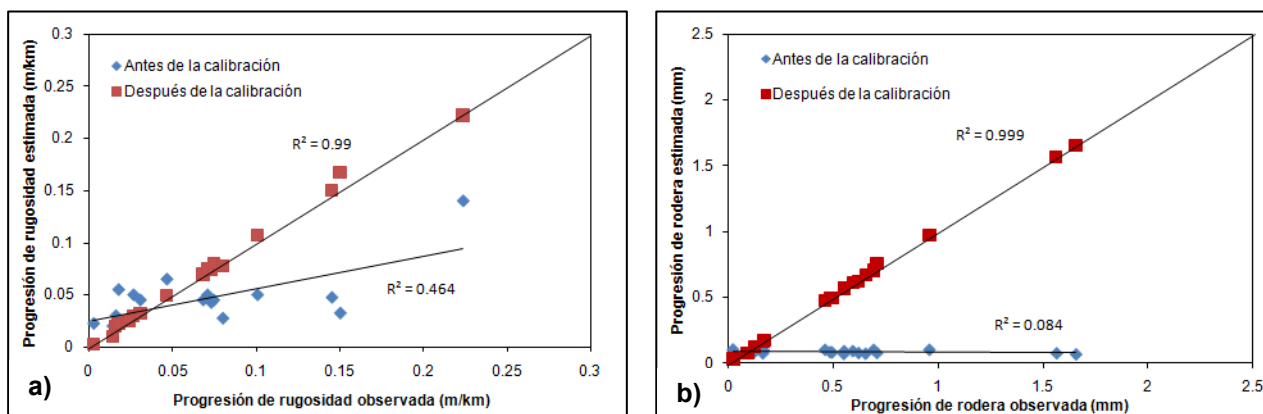


Figura 4. Relaciones entre progresión del deterioro observado y estimado (a. Rugosidad, b. Rodera).

6. ANÁLISIS DE LAS CURVAS DE DETERIORO

El propósito del análisis de la condición en el Micro PAVER es evaluar la condición pasada y futura del pavimento a nivel de red y de sección. El nivel de red se observa en forma de resumen, mientras que a nivel de sección se presenta la información a detalle. Los cálculos de la condición se realizan a nivel de sección y luego son integrados para producir los resultados a nivel de red.

La condición pasada es determinada por interpolación lineal entre los resultados de la inspección pasada y la última fecha de construcción (donde se supone que el PCI es 100). La condición de la sección más allá de la última inspección se determina mediante la predicción de la condición futura basada en la curva de deterioro de la familia asignada a la sección.

En el caso del HDM-4, las relaciones incluidas sirven para modelar el deterioro (RD) y los efectos de las obras (WE) en los pavimentos. Estas se utilizan con el propósito de predecir la condición anual y para evaluar las estrategias de las obras. Las relaciones deben de vincular las especificaciones y los costos para la construcción y el mantenimiento de las carreteras a los costos de su uso a través de los modelos de los costos de los usuarios de las carreteras [12].

El HDM-4 calcula el deterioro de pavimentos sobre una base anual, antes de analizar los efectos de las acciones de conservación y mejoramiento propuestas por el usuario. El procedimiento de cálculo involucrado en la predicción del deterioro puede dividirse las siguientes fases: a) Cálculo de la capacidad estructural del pavimento; b) Evaluación del cambio en los deterioros superficiales; c) Obtención del área dañada; d) Cálculo del cambio en la profundidad de roderas; e) Obtención del IRI al final del año.

6.1. Predicción del deterioro en Micro PAVER

Una vez desarrollado el modelo de familia para la sección de estudio, se realizó una predicción del deterioro para un periodo de 15 años a nivel de red, iniciando en el año 2011. El propósito de efectuar la predicción de la condición durante este periodo de tiempo es observar cómo evoluciona el desempeño del pavimento y evaluar los resultados arrojados por el modelo Micro PAVER. Para evaluar de forma más completa las capacidades del modelo se plantearon diferentes escenarios, los cuales se mencionan a continuación:

1. Predicción de la condición sin realizar ninguna acción de MR&R
2. Predicción de la condición programando acciones de mantenimiento preventivo localizado
3. Predicción de la condición programando acciones de mantenimiento preventivo localizado y trabajos adicionales

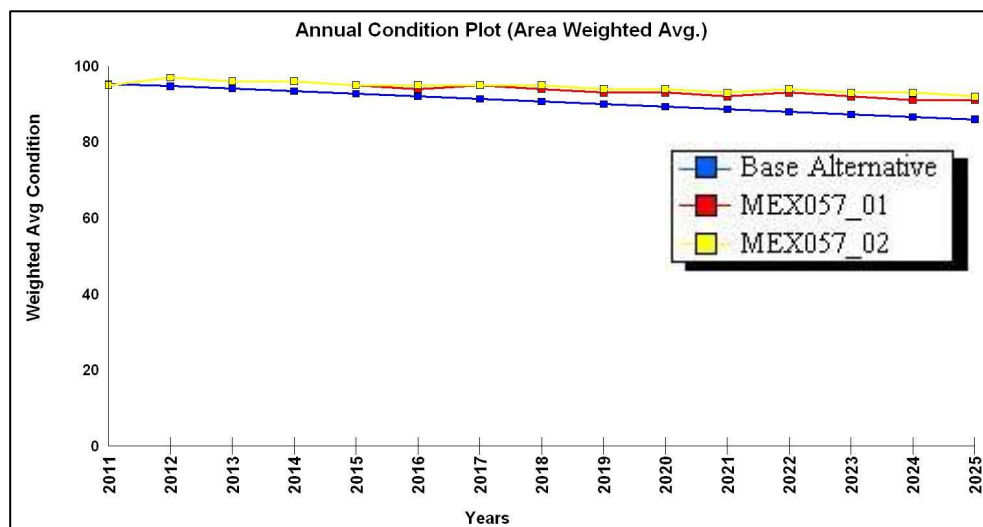


Figura 5. Predicción de la condición de la sección de estudio con Micro PAVER.

En la figura 5, la línea “alternativa base” representa la predicción sin efectuar ninguna acción de mantenimiento en el pavimento (escenario 1), el valor del PCI es de 95.29 al inicio de la predicción en el año 2011 y para el final del periodo predicho en el año 2025 el PCI disminuye hasta un valor de 85.97.

La línea “MEX057_01” representa el comportamiento estimado realizando acciones de mantenimiento preventivo localizado (escenario 2), los trabajos programados consisten en efectuar tratamientos superficiales (tales como sellado de grietas y slurry seals) el efecto de los tratamientos propuestos incrementa el valor predicho del PCI al final del periodo analizado en comparación con el escenario 1, por lo que, se obtiene una condición final con un PCI de 91.0.

Para la alternativa “MEX057_02” se programaron acciones de mantenimiento preventivo localizado con las mismas alternativas de tratamientos superficiales y adicionalmente se propuso aplicar trabajos de bacheo superficial (escenario 3). La condición predicha alcanzada para el año 2025 arroja un valor de PCI igual a 92.0.

6.2. Predicción del deterioro con HDM-4

Para analizar los modelos de predicción de desempeño del HDM-4 se plantearon diferentes escenarios, al igual que en el Micro PAVER, para programar las acciones de

mantenimiento. En los diferentes escenarios propuestos se tomaron como referencia las técnicas de conservación que normalmente utiliza la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), a continuación se mencionan los escenarios propuestos:

1. Predicción de la condición sin acciones de mantenimiento
2. Predicción de la condición con acciones de conservación rutinaria
3. Predicción de la condición con acciones de conservación periódica

La figura 6 muestra los resultados de la predicción para los diferentes escenarios planteados a nivel de proyecto (promediando los resultados de las predicciones de cada sección evaluada). La alternativa base representa el escenario 1 (predicción sin realizar acciones de mantenimiento). Como se puede observar, al final del periodo de predicción (15 años) la condición del pavimento alcanza el valor máximo de IRI permitido por el HDM-4, también podemos ver que en el año 2017 se supera el límite máximo de IRI, establecido por la SCT con un valor de 2.81 m/km para cualquier carretera ubicada en corredores, red básica y red secundaria.

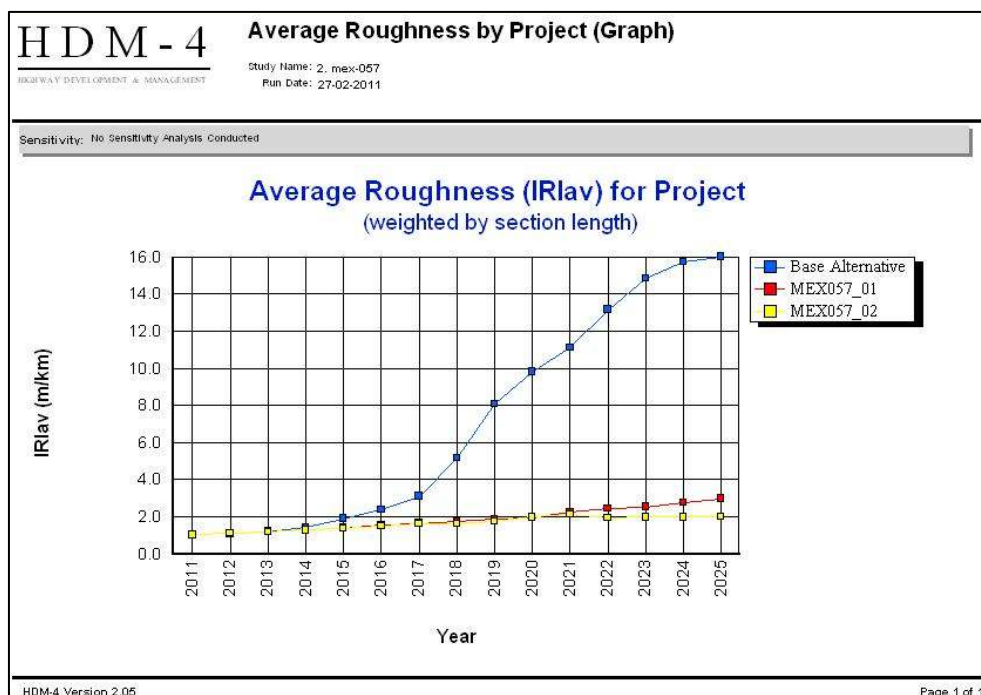


Figura 6. Predicción de la condición de la sección de estudio con HDM-4.

El escenario 2 (alternativa MEX057_01 de la gráfica), contempla llevar a cabo acciones de conservación rutinaria, los trabajos propuestos consisten en riegos de sello, bacheo superficial y profundo. Aplicando este tipo de tratamientos se observa que el IRI se mantiene por debajo del límite en la mayor parte del periodo de análisis, siendo superado en el último año de predicción.

Por último el escenario 3 (alternativa MEX057_02), consiste en efectuar acciones de conservación periódica, los trabajos programados para esta alternativa consisten en fresado y colocación de microcarpeta, además de bacheo superficial. Como se puede ver en la gráfica con estos tratamientos propuestos el IRI se mantiene por debajo del límite en todo el periodo de análisis establecido.

6.3. Análisis de las curvas de deterioro

Debido a que cada modelo de predicción emplea diferentes índices (PCI e IRI) para determinar el nivel de deterioro presente en el pavimento, se requiere buscar algún parámetro que relacione estos dos índices para realizar una comparación de los resultados obtenidos entre ellos.

Dentro del estudio desarrollado por Park, Lee, y Natacha [13], se propuso relacionar los daños en la superficie del pavimento, su rugosidad e índice de condición. El estudio presenta un nuevo método para estimar la condición del pavimento, tal como se conduce por el Índice de Condición de Pavimentos (PCI), utilizando el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), que es estrictamente la evaluación directa de la condición del pavimento. Una transformación de un modelo de regresión lineal predice la condición del pavimento dada la rugosidad. Por lo que, se confirma la aceptación del IRI como una variable predictiva del PCI. Además, un análisis de varianza efectuado confirma la existencia de fuertes relaciones entre ambas variables.

Una vez obtenida la relación para los dos índices empleados por los modelos de predicción, la siguiente tarea consiste en definir los límites para aplicar en el estudio y calificar el estado del pavimento en distintas condiciones (por ejemplo de bueno a deficiente).

Micro PAVER define este límite como PCI crítico, el cual es el valor del PCI en donde la tasa de disminución del PCI aumenta con el tiempo, o el costo de las acciones de mantenimiento preventivo localizado aumenta significativamente. Para el HDM-4 este límite se establece en base al valor de IRI máximo permitido, como se mencionó anteriormente este se ha fijado para un valor de 2.81 m/km. El valor del PCI crítico, que pertenece al límite establecido por el IRI, corresponde a un valor de 55, el cual fue estimado aplicando el modelo de regresión desarrollado por Park, Lee y Natacha [13].

Analizando el escenario 1 podemos observar que para el Micro PAVER durante el periodo de análisis el PCI se mantiene muy por encima del PCI crítico, calificando la condición del pavimento como buena. Por lo que, no es necesario llevar a cabo acciones de mantenimiento en la sección de estudio en función del valor PCI obtenido.

Por otro lado, para el mismo escenario el HDM-4 predice que para el año 2017 el límite de 2.81 m/km se ve superado colocando la condición del pavimento como mala. En estos resultados obtenidos para el escenario 1 manifiestan la necesidad de aplicar las acciones de mantenimiento en un periodo corto de tiempo después de realizar la predicción.

Las acciones de mantenimiento programadas en el escenario 2 en Micro PAVER permiten observar una disminución en la tasa de deterioro, incrementando el valor del PCI al final del periodo de análisis en comparación con la alternativa 1.

En el HDM-4 existe una mayor flexibilidad para programar las acciones de mantenimiento, sin embargo, para propósitos de realizar la comparación del escenario 2 con el Micro PAVER se programaron trabajos de mantenimiento rutinario, ya que este es el nivel más bajo de mantenimiento de acuerdo con las técnicas comúnmente empleadas por la SCT. El HDM-4 permite programar los tratamientos en base a activadores definidos por el usuario para cada tipo de deterioro, por ejemplo, para el escenario 2 los activadores se definieron en función del área agrietada y el número de baches por kilómetro. Los beneficios de programar las acciones de mantenimiento en el escenario 2 son más que

evidentes ya que el IRI permanece por debajo del máximo especificado casi durante todo el periodo análisis, siendo superado este límite solo en el último año de predicción.

Al aplicar las políticas de mantenimiento en el escenario 3 la predicción hecha con Micro PAVER no presenta un beneficio sustancial en la disminución de la tasa de deterioro, en comparación con la alternativa 2. Por lo que, los trabajos adicionales compuestos por bacheos superficiales no se considera que tengan un relación costo-beneficio adecuada.

Los tratamientos programados en el HDM-4 para este mismo escenario en un inicio consistieron en trabajos de fresado y colocación de microcarpeta, sin embargo, al hacer las primeras predicciones con estos trabajos el IRI superaba el límite de 2.81 m/km, por lo que, fue necesario adicionar acciones de bacheo superficial. Los resultados de aplicar el escenario 3 son muy similares a los obtenidos con el escenario 2, la diferencia es que en el escenario 2 el valor del IRI máximo se ve superado al final del periodo de análisis, lo cual no sucede para el escenario 3 ya el valor de IRI se mantiene por debajo del máximo en todo el periodo de análisis.

Una comparación general de los modelos de predicción del Micro PAVER y el HDM-4, en el caso específico de la aplicación analizada en el estudio, nos indica que cada uno de los modelos arroja resultados muy distintos en función de la condición del pavimento predicha para el periodo evaluado. Buscando las causas de la diferencia en los resultados obtenidos en la predicción del desempeño podemos mencionar las siguientes:

- A pesar de que el PCI es un índice objetivo, la confiabilidad de su obtención depende de la experiencia y juicio del personal que efectúe el inventario de deterioros.
- Los modelos de inicio y progresión de baches y desgranamiento, no fueron calibrados en la investigación, debido principalmente a que no fueron identificados en los inventarios de deterioros realizados, ya que las políticas de mantenimiento aplicadas en la sección de estudio no permitieron observarlos. Al no estar calibrados estos modelos es posible que la tasa de deterioro se incremente debido a los factores adoptados por defecto.
- La poca información para aplicar los modelos de predicción del Micro PAVER, ya que la familia del pavimento fue definida solo con información de dos inventarios de deterioros en un periodo de tiempo muy corto.
- La naturaleza de los modelos de predicción del Micro PAVER al no considerar algunas variables muy influyentes en los procesos de deterioro de los pavimentos, como la capacidad estructural del pavimento.

7. CONCLUSIONES

De acuerdo a la comparación realizada de los modelos de predicción, se observan resultados muy distintos, Micro PAVER califica como buena la condición del pavimento en todo el periodo de análisis con un alto PCI. En el caso del HDM-4 el estado del pavimento pasa a un estado de deterioro muy alto, superando el límite de IRI establecido en un corto periodo de tiempo.

La programación de los distintos escenarios planteados nos permitió observar con más detalle los modelos de predicción de desempeño, llevando a cabo acciones de mantenimiento en la sección de estudio, además de que observamos de mejor forma la eficacia de los distintos tratamientos propuestos.

Las posibles causas de haber obtenido resultados muy distintos con los dos modelos de predicción pueden ser: la subjetividad al obtener el inventario de deterioros para poder estimar el PCI, la falta de calibración de los demás modelos de deterioro en el HDM-4, el número limitado de datos para el desarrollo de la familia y la naturaleza de los modelos del Micro PAVER.

Las ventajas del Micro PAVER con respecto al HDM-4 son la facilidad de operación, el bajo costo de la información requerida, lo cual lo hace una herramienta muy atractiva para las agencias que desean iniciar su Sistema de Gestión de Pavimentos. Por otro lado, el HDM-4 es una herramienta muy potente, debido sobre todo a la evolución que han tenido los modelos de deterioro, ya que se ha actualizado continuamente gracias a la experiencia de distintos países, que lo han aplicado, lo que lo convierte en una herramienta muy confiable para la mayoría de las agencias de carreteras.

Finalmente, podemos concluir, que la base para la implementación de un Sistema de Gestión de Pavimentos consiste en contar con la información necesaria en cantidad y calidad, ya que alimentar los Sistemas con información insuficiente o inadecuada, conduce a predicciones erróneas y a soluciones inadecuadas.

La herramienta adecuada debe seleccionarse de acuerdo a la información con la que se cuenta y la certeza de la predicción dependerá de la calidad y cantidad de datos disponible, por lo tanto no es recomendable implementar Sistemas complejos si no se cuenta con información adecuada.

REFERENCIAS

1. American Association of State Highway and Transportation Officials (1993). Guide for Design of Pavement Structures. Washington, D.C. AASHTO.
2. Rodríguez R. M. (1991). Estudio do trincamento dos pavimentos. Tese (Doutorado) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio Janeiro, Rio de Janeiro.
3. Shahin, M. Y (1992). 20 Years experience in the PAVER Pavement Management System: Development and Implementation. Pavement Management Implementation. ASTM STP 1121, pp 256-271.
4. Crespo del Río, R. (1991). Sistema de Gestión de Firms I, Equipos y Técnicas de Auscultación. Revista Rutas, N° 23, pp 10-14.
5. ASTM D 6433-03. Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken. United States.
6. M. N. Nunez and M. Y. Shahin. (1986). "Pavement Condition Data Analysis and Modeling", Transportation Research Board.
7. Solorio M. R., Hernández D. R. Gómez L. A. (2004). Análisis de sensibilidad de los modelos de deterioro del hdm-4 para pavimentos asfálticos. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No 253. Querétaro.
8. Arroyo Osorno J. A., Aguerrebere Salido R., Torres Vargas G. (2008). Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano 2008. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación técnica 316. Querétaro.
9. Videla C.; de Solminihac H.; Gaete, R. y Bustos, M., Análisis Comparativo de la Calidad de la Predicción del Deterioro en Pavimentos Asfálticos entre Metodologías de Ventanas y Seguimiento en Tramos Testigo, 9° Congreso Ibero-latinoamericano del Asfalto, Asunción, Paraguay, 2 a 7 noviembre, Tomo 3, Tema 7 Gerencia de Pavimentos, pp. 1155 – 1168, 1997.
10. Hickson I., Hoque Z., Martin T., Choummanivong L. (2008). Development of HDM-4 Road Deterioration (RD) Model Calibrations for Sealed Granular and Asphalt Roads. Technical report No. AP-T97/08. Austroads.
11. Bennett, CR & Paterson W. (2000). A guide to calibration and adaptation, vol. 5, highway development and management, HDM-4 series of publications, World Bank, Washington DC, & PIARC, Paris, France
12. Odoki J.B. y Kerali H. G. (2000). Analytical Framework and Model Descriptions. Volume Four. Analytical Framework and Model Descriptions. París, Francia. Asociación Mundial de Carreteras (PIARC).
13. Park, K., K. Lee, and Natacha T. 2004. "Applicability of the International Roughness Index as a Predictor of Asphalt Pavement Condition", Journal of Transportation Research Board (2004). The 83rd Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D. C.