



**Certificación ISO 9001:2000 ‡
Laboratorios acreditados por EMA §**

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS MODELOS DE DETERIORO DEL HDM-4 PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Ricardo Solorio Murillo
Roberto Israel Hernández Domínguez
José Antonio Gómez López

**Publicación Técnica No 253
Sanfandila, Qro, 2004**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Análisis de sensibilidad de los
modelos de deterioro del HDM-4
para pavimentos asfálticos**

Publicación Técnica No. 253
Sanfandila, Qro., 2004

Este trabajo fue desarrollado por el MC Ricardo Solorio Murillo, MI Roberto Israel Hernández Domínguez y MI José Antonio Gómez López, investigadores de la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

Los autores desean expresar su agradecimiento al MC Rodolfo Téllez Gutiérrez, Coordinador de Infraestructura y al Dr Paul Garnica Anguas, Jefe de la División de Laboratorios, ambos del IMT, así como al MC Mauricio Salgado Torres, profesor de la Universidad Javeriana de Bogotá, Colombia, por sus valiosos comentarios y sugerencias, que en más de un sentido enriquecieron el desarrollo de este trabajo.

Se agradece la colaboración de los investigadores Ing Santa Ludinette Cárdenas Rodríguez y TSUT Joel Bustamante Altamirano de la Coordinación de Infraestructura.

Índice

| | |
|---|-----|
| Resumen | III |
| Abstract | V |
| Resumen ejecutivo | VII |
| Introducción | 1 |
| 1. Antecedentes | 3 |
| 1.1 Sistemas de gestión de pavimentos | 3 |
| 1.2 El HDM-4 como parte del sistema de gestión | 5 |
| 1.3 Desarrollo histórico del HDM | 9 |
| 1.4 Importancia de la sensibilidad del HDM | 11 |
| 1.5 Trabajos previos relacionados con la sensibilidad Del modelo HDM | 12 |
| 2. Descripción del análisis | 19 |
| 2.1 Importancia del IRI en la metodología de análisis del HDM-4 | 19 |
| 2.2 Análisis del número estructural y cálculo de las velocidades de operación del tránsito | 21 |
| 2.3 Procedimiento para el cálculo de la sensibilidad | 22 |
| 2.4 Descripción de los casos de análisis | 26 |
| 2.5 Programación de los modelos en VBA de Excel | 28 |
| 3. Estimación del deterioro de pavimentos asfálticos con el HDM-4 | 31 |
| 3.1 Causas del deterioro de pavimentos | 31 |
| 3.2 Tipos de pavimento considerados | 35 |
| 3.3 Tipos de deterioro | 35 |
| 3.4 Descripción general de los modelos | 37 |
| 3.5 Procedimiento de cálculo | 38 |
| 3.6 Capacidad estructural del pavimento | 41 |
| 3.7 Agrietamiento | 44 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.8 | Baches | 45 |
| 3.9 | Área dañada y no dañada | 47 |
| 3.10 | Rodera | 48 |
| 4. | Discusión de los resultados | 57 |
| 4.1 | Observaciones sobre la aplicación de los modelos | 57 |
| 4.2 | Resultados de análisis | 61 |
| | Conclusiones | 81 |
| | Referencias | 83 |

Resumen

Se presenta un análisis de sensibilidad de los modelos de deterioro del HDM-4 para pavimentos asfálticos, en el cual se ha tratado de tomar en cuenta la variedad de condiciones en las que tales modelos pueden aplicarse. El análisis se basa en el enfoque *ceteris paribus*, cuyo principio básico consiste en analizar el impacto de un parámetro de entrada en un resultado de referencia, manteniendo constantes los demás parámetros. Al aplicar este enfoque, se ha explorado la influencia de factores como los porcentajes de variación utilizados, y el nivel de deterioro alcanzado por el camino en el momento de calificar el impacto de los parámetros.

Como resultados de referencia se han empleado el Índice Internacional de Irregularidad (IRI) y el Número Estructural Ajustado (SNP). La sensibilidad se evaluó a través del concepto de elasticidad del impacto.

A fin de evitar la navegación por la interfaz de usuario del HDM-4 que se requeriría para hacer el análisis y, al mismo tiempo conocer con mayor detalle los modelos, se decidió desarrollar una herramienta de cómputo en Visual Basic para aplicaciones de excel. Todos los cálculos involucrados en el análisis se realizaron con esta herramienta.

En los antecedentes del trabajo se incluyen secciones dedicadas a la descripción general de los sistemas de gestión de pavimentos y del sistema HDM-4, con el propósito de ubicar el proyecto en el contexto que le corresponde.

Abstract

A sensitivity analysis of HDM-4 asphalt pavements deterioration models is described in this document. The analysis has tried to take into account the various conditions under which these models can be applied. Sensitivity calculations are based on the *ceteris paribus* approach, whose main principle consists of analyzing the impact of an input parameter on a reference result, holding all other parameters constant. In this analysis, an effort has been made to evaluate the effects of factors such as the percentage of change used and the level of pavement deterioration under which the parameters impact is assessed.

The International Roughness Index (IRI) and the Adjusted Structural Number (SNP) has been used as reference results. Sensitivity has been quantified using the concept of impact elasticity.

In order to avoid the HDM-4 user interface navigation required for doing the analysis, and to have a deeper insight in the models, a set of computer programs has been developed using Excel *Visual Basic for Applications*. All calculations involved in the analysis were performed using this set of programs.

To put the project into context, the background section includes subsections dealing with pavement management systems and the HDM-4 system.

Resumen ejecutivo

La gestión de pavimentos constituye una de las funciones más importantes en las organizaciones operadoras de carreteras. Los sistemas de gestión de pavimentos son un conjunto de procedimientos y herramientas que tienen como propósito asistir a estas organizaciones en la aplicación sistemática de procesos relacionados con este aspecto.

Entre las principales componentes de un sistema de gestión pueden mencionarse: un conjunto de programas de cómputo para la información requerida por el sistema; herramientas de análisis para la predicción del deterioro de pavimentos; evaluación económica de proyectos carreteros, y la formulación de programas.

El sistema HDM-4 desarrollado bajo los auspicios de diferentes organizaciones internacionales de carreteras y entidades financieras, y comercializado por la Asociación Mundial de Carreteras, PIARC, constituye una alternativa muy atractiva para implementar las herramientas de análisis de los sistemas de gestión de pavimentos.

Una de las principales desventajas del HDM-4 consiste en que su aplicación implica un número muy importante de datos de entrada (del orden de 800 para una aplicación común), muchos de los cuales es necesario obtener en campo a costos frecuentemente prohibitivos. De lo anterior se desprende la necesidad de estudiar la sensibilidad de los modelos internos del HDM-4 a fin de jerarquizar cada uno de los parámetros que intervienen en ellos, de acuerdo con su impacto en los resultados del sistema, y generar un listado de las variables cuyos valores resulta indispensable obtener en campo o en gabinete a fin de garantizar la validez de los resultados generados.

En el pasado se realizaron distintos estudios relacionados con la sensibilidad del modelo HDM, los cuales tienen en común la característica de que evalúan el impacto de los parámetros para condiciones específicas.

El objetivo del presente trabajo consistió en analizar la sensibilidad de los modelos de deterioro del HDM-4 para pavimentos asfálticos, tomando en cuenta la variedad de condiciones en la que pueden aplicarse. Para lograr lo anterior se propuso una metodología que, a grandes rasgos, considera diversos porcentajes de variación de los parámetros y toma en cuenta el nivel de deterioro de los pavimentos en el momento de evaluar el impacto de los distintos parámetros de entrada.

El análisis se basa en el enfoque *ceteris paribus*, cuyo principio fundamental es analizar el impacto de un parámetro de entrada en un resultado de referencia, manteniendo constantes los demás parámetros. Para la cuantificación de la sensibilidad se utiliza el concepto de *elasticidad del impacto*, que consiste en obtener la relación entre el cambio de un resultado de referencia con respecto al cambio de un parámetro de entrada.

Como resultados de referencia se emplearon el Índice Internacional de Irregularidad (IRI) y el Número Estructural Ajustado (SNP), en virtud de la importancia de estos indicadores en la caracterización del estado global de los pavimentos asfálticos.

Para aplicar la metodología, se desarrollaron un conjunto de programas de cómputo en *Visual Basic for Applications (VBA)* de Excel, a partir de las ecuaciones de los modelos que se describen en el capítulo 3. Esta alternativa se prefirió sobre el uso del software del sistema para evitar complicaciones relacionadas con la interfaz de usuario del HDM-4, la cual no se diseñó para estudios de sensibilidad ni profundizar en el estudio de los modelos.

Con la herramienta anterior se obtuvo un conjunto de gráficas de sensibilidad que muestran el impacto de los parámetros de los modelos en los resultados de referencia elegidos (IRI y SNP) para distintos porcentajes de variación de los parámetros, y para todo el rango de evolución del deterioro de los pavimentos. Estas gráficas se utilizaron como base para clasificar el impacto de cada parámetro y generar un listado de datos de entrada jerarquizado en función de la sensibilidad.

La metodología propuesta puede utilizarse para evaluar otros resultados de referencia de los modelos de deterioro, y analizar la sensibilidad del resto de los modelos incorporados al sistema.

Introducción

A fin de mejorar los procesos internos relacionados con la conservación y mejoramiento de las redes a su cargo, las organizaciones operadoras de carreteras han venido mostrando en los últimos años un creciente interés por la implantación de sistemas de gestión de pavimentos. Sin embargo, la carencia de herramientas de análisis confiables en el ámbito nacional ha provocado que las entidades responsables de la operación vial pospongan sus proyectos relacionados con el desarrollo de sistemas de gestión.

El HDM-4 representa una opción para implementar la parte de los sistemas de gestión de pavimentos relativa a las herramientas de análisis, por tratarse de un método basado en estudios de campo exhaustivos desarrollados en países con condiciones razonablemente parecidas a las de México, y está respaldado por organismos internacionales ampliamente reconocidos.

Una de las desventajas del HDM-4 es el número de parámetros de entrada; una parte importante de los cuales se obtienen mediante estudios de campo costosos, por lo que resulta imperativo realizar análisis de sensibilidad para identificar los parámetros con mayor influencia en los resultados, y optimizar el uso de los recursos disponibles en la recopilación de información en campo y en gabinete.

Con el presente trabajo se pretende contribuir a conocer la sensibilidad del HDM-4, particularmente en lo que se refiere a los modelos de deterioro para pavimentos asfálticos, mediante una metodología de análisis y la medición del impacto de los distintos parámetros utilizados por tales modelos.

El trabajo se encuentra estructurado como se describe a continuación.

El capítulo 1 presenta en forma detallada los antecedentes del trabajo, los cuales básicamente se refieren a los sistemas de gestión de pavimentos y sus componentes, al uso del HDM-4 como parte de un sistema de gestión, y a los análisis de sensibilidad del sistema realizados en el pasado.

El capítulo 2 describe la metodología empleada en el trabajo, los casos de análisis específicamente considerados y las herramientas utilizadas.

El capítulo 3 contiene un resumen de los modelos de deterioro de pavimentos asfálticos, el cual sirve como referencia para un mejor entendimiento del comportamiento de los modelos.

El capítulo 4 es la discusión de los resultados e incluye un conjunto de observaciones relativas al proceso de aplicación de los modelos, el listado de los parámetros jerarquizados de acuerdo con su impacto en los resultados, y algunos ejemplos sobre el comportamiento particular de los datos de entrada con respecto a la sensibilidad. Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo.

1 Antecedentes

1.1 Sistemas de gestión de pavimentos

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 [AASHTO, 1993]. En concordancia con lo anterior, constituye una de las funciones más importantes de las dependencias de gobierno que tienen a su cargo el desarrollo y la preservación de infraestructura vial.

Alternativamente, puede considerarse como un conjunto de operaciones que se ejecutan con el propósito de mantener por determinado tiempo, las condiciones que implica la operación de vehículos con un nivel de servicio dado, minimizando los costos económicos, sociales y ambientales involucrados [Solminihac, 2001].

En términos generales, los sistemas de gestión de pavimentos son conjuntos de procedimientos y herramientas que tienen como propósito asistir a las organizaciones operadoras de carreteras en la aplicación sistemática de procesos relacionados con la gestión de pavimentos, particularmente la identificación de alternativas técnica y económicamente óptimas para la conservación de la red en el corto y mediano plazos, así como la formulación de programas de mantenimiento anuales y/o multianuales.

De acuerdo con las recomendaciones de la Norma ASTM E1166 – 00, la adopción de un sistema de gestión de pavimentos involucra la integración de las siguientes componentes [ASTM, 2003]:

1. Sistema de referencia. Se refiere a un método único y estable para la identificación y referencia espacial de los tramos que constituyen la red de carreteras, así como de la información sobre las características y el estado físico de los mismos. Entre los métodos más utilizados pueden mencionarse el sistema arco-nodo, el cadenamamiento, y las coordenadas geográficas
2. Información requerida *por el sistema*. Normalmente, los sistemas de gestión utilizan datos pertenecientes a las siguientes categorías:
 - a) Inventario de la red, el cual comprende la clasificación funcional, longitud, número de carriles, ancho de carril y acotamientos, pendiente y curvatura de cada uno de los tramos; diseño estructural de la sección, incluyendo espesores y propiedades de los materiales de las capas constitutivas; características del

drenaje e historial de reparaciones

- b) Estado del pavimento, expresado en términos de la irregularidad de la superficie de rodamiento; presencia y magnitud de deterioros; deflexiones y otros parámetros de la capacidad estructural del pavimento; espesores y propiedades reales de las capas constitutivas; resistencia al deslizamiento y textura y estado del drenaje
 - c) Características del tránsito: volumen, composición vehicular y cargas por tipo de vehículo
 - d) Datos climatológicos, entre los cuales pueden mencionarse precipitación, humedad, promedios de temperatura y rangos de variación de la misma
 - e) Costos, incluyendo, por una parte, los costos de construcción, mantenimiento, rehabilitación y modernización de los pavimentos, y por otra, los costos relacionados con el uso de la infraestructura por parte de los usuarios, es decir, costos de operación vehicular, costos asociados con el valor del tiempo de pasajeros y la demora de mercancías, y costos de accidentes
3. *Manejador de bases de datos.* Dependiendo del tamaño de la red por analizar, el volumen de información requerido por los sistemas de gestión de pavimentos puede llegar a tener una magnitud considerable, por lo que en la mayoría de los casos, implica el uso de un manejador de bases de datos y de procedimientos computarizados para el almacenamiento, consulta y análisis de la información. Como consecuencia de la vinculación de las carreteras con el entorno y el desarrollo de tecnologías, como los sistemas de posicionamiento global y los sistemas de información geográfica, en los últimos años se ha observado una tendencia mundial hacia el uso de bases de datos georreferenciadas como respaldo para el desarrollo de sistemas de gestión de pavimentos.
4. *Herramientas de análisis.* Se refieren a un conjunto de modelos matemáticos que se utilizan como apoyo para las siguientes tareas:
- a) Predicción del deterioro del pavimento a lo largo de su vida útil, y estimación de los efectos de las acciones de conservación
 - b) Evaluación económica de proyectos de conservación y mejoramiento para tramos específicos, así como de políticas aplicables a toda la red o a partes de ella. Para este propósito se utilizan métodos como el análisis del ciclo de vida o el de costo-beneficio
 - c) Definición de prioridades con respecto a los requerimientos de conservación y mejoramiento de la red, a través del análisis de proyectos candidatos, y la programación de los trabajos.

Usualmente, los algoritmos para definir prioridades utilizan criterios como el estado del pavimento, tasa de deterioro del mismo, y volumen de tránsito, entre otros

- d) Optimización de los programas de conservación con objeto de maximizar los niveles de desempeño del pavimento o la rentabilidad de las inversiones correspondientes. En la mayoría de los casos, los modelos de optimización utilizan técnicas de programación matemática
- e) Evaluación del impacto de distintas estrategias de conservación y niveles de disponibilidad de recursos en el desempeño de la red

De acuerdo con la Norma ASTM E 1166 – 00, la puesta en operación de un sistema de gestión de pavimentos requiere un estudio previo en el que se evalúe su compatibilidad con otros procesos institucionales existentes; su utilidad real en la planeación y programación de los trabajos de conservación y desarrollo de la red; y su aceptación por parte de los responsables de la gestión de los pavimentos al interior de la organización operadora.

Asimismo, se requiere un plan en el que se definan el equipo y programas de cómputo; equipo de medición; personal y estructura organizacional necesarios para la operación del sistema, así como un programa para su implantación por etapas. El plan debe incluir también, procedimientos para la recopilación; ingreso; validación y actualización de información; generación de informes; y la revisión, calibración y mejoramiento de los modelos del sistema.

1.2 El HDM-4 como parte de un sistema de gestión

El sistema para el desarrollo y gestión de carreteras (*Highway Development and Management System*), conocido por las siglas HDM-4, es un conjunto de herramientas para el análisis técnico y económico de alternativas de inversión relacionadas con la conservación y mejoramiento de carreteras; estas herramientas se encuentran integradas en un programa de cómputo desarrollado por la Universidad de Birmingham, como producto principal del estudio internacional sobre desarrollo y gestión de carreteras (ISOHDM, por las siglas *International Study of Highway Development and Management*).

El estudio ISOHDM se desarrolló bajo los auspicios de un grupo de organizaciones de varios países pudiéndose mencionar el Departamento para el Desarrollo Internacional, del Reino Unido (DFID); el Banco Mundial; el Banco Asiático de Desarrollo (ADB); y la Administración Nacional de Caminos de Suecia (SNRA). Contribuyeron la Administración Nacional de Caminos, de Finlandia (FINNRA); la Administración Federal de Carreteras, de los Estados Unidos de América (FHWA); los gobiernos de Malasia, Francia, Sudáfrica y Japón; y la Federación Interamericana de Fabricantes de Cemento (FICEM). El estudio estuvo

coordinado por la Asociación Mundial de Carreteras (PIARC) y la Universidad de Birmingham.

Las herramientas incorporadas al HDM-4 permiten tareas como las siguientes:

1. Predecir el deterioro del pavimento durante su vida útil.
2. Calcular los efectos de acciones de conservación y mejoramiento del pavimento.
3. Estimar costos de operación vehicular y otros propios de los usuarios de infraestructura vial.
4. Determinar los efectos de la congestión en la velocidad de operación de vehículos, en los costos de operación vehicular.
5. Evaluar proyectos, políticas y programas de conservación en términos técnicos y económicos, obteniendo los montos y beneficios de cada alternativa considerada, y calcular indicadores de rentabilidad como el valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR). En términos generales, los costos incluidos en el análisis corresponden al gasto corriente y de inversión en los que debe incurrir la organización operadora para que se ejecuten las obras, mientras que los beneficios se derivan principalmente de ahorros en gastos de operación vehicular y disminución de los tiempos de recorrido, inducidos ambos por el mejoramiento del estado físico de las carreteras, y la reducción de la congestión.
6. Optimizar programas de conservación y mejoramiento sujetos a restricciones presupuestales.
7. Calcular los montos de inversión necesarios para mantener determinado nivel de servicio en una red carretera o estimar el nivel de servicio que puede lograrse con un techo financiero dado.
8. Evaluar los efectos de políticas de largo plazo, como son cambios en las cargas legales del tránsito, estándares de conservación de pavimentos, y normas de diseño.

En la Figura 1.1 se muestra la arquitectura del sistema HDM-4 [Kerali, 2000].

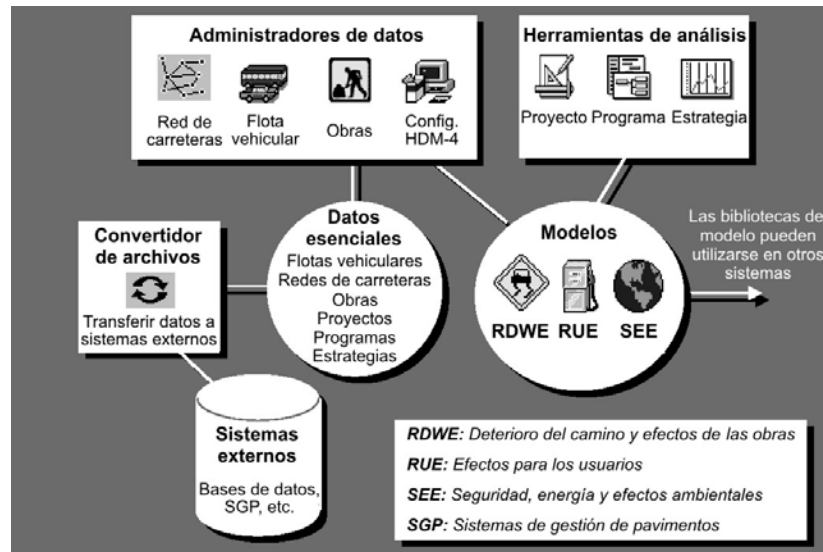


Figura 1.1
Arquitectura del sistema HDM-4 [Kerali, 2000]

Entre las componentes de la Figura 1.1 destaca, por una parte, la referente a los modelos internos del sistema. Como se aprecia, el HDM-4 emplea tres grupos de modelos:

1. Modelos de deterioro, y efectos de las obras (RDWE por las siglas *Road Deterioration and Works Effects*) Estos modelos permiten predecir, para un periodo de análisis definido por el usuario, la evolución del estado físico de las carreteras en función de las solicitaciones impuestas por el tránsito, de las condiciones climatológicas, y del tipo de pavimento; asimismo, los modelos estiman los efectos de las obras de conservación y mejoramiento más usuales. El HDM-4 incorpora modelos para distintos tipos de pavimentos, tanto flexibles como 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.

Otra de las componentes más importantes del HDM-4 está constituida por las herramientas de análisis o aplicaciones del sistema, las cuales tienen como propósito evaluar proyectos, programas y estrategias de conservación y mejoramiento de carreteras, y la optimización de programas en presencia de restricciones presupuestales. A continuación se describe brevemente cada de las aplicaciones específicas disponibles en el HDM-4 [Kerali, 2000].

1. Análisis de proyectos. Se refiere a la evaluación de alternativas de proyecto para la conservación y mejoramiento de un conjunto de tramos, durante un periodo de análisis determinado. El sistema compara las alternativas empleando indicadores de rentabilidad económica, los cuales obtiene a partir de los costos y beneficios anuales de cada alternativa.
2. Análisis de programas. Consiste básicamente en jerarquizar una lista de proyectos candidatos de acuerdo con su nivel de rentabilidad, a fin de obtener un programa de obra anual o multianual que cumpla con las restricciones presupuestales de la organización en el periodo considerado. En términos generales, el análisis de programas permite obtener una combinación de opciones de proyecto que maximizan el rendimiento económico de las inversiones, tomando en cuenta las limitaciones de recursos existentes.
3. Análisis de estrategias. Tiene como propósito evaluar políticas de largo plazo para la conservación y mejoramiento de una red o subred de carreteras. Entre los problemas específicos que pueden resolverse con este tipo de análisis se encuentra el cálculo de los montos de inversión necesarios para lograr un determinado nivel de servicio en la red, determinar el estado futuro de la red para los niveles de inversión actuales, y evaluar estándares de conservación, entre otros.

De lo expuesto en este inciso, y con referencia a la descripción de los sistemas de gestión de pavimentos presentada en 1.1, se puede concluir que el HDM-4 abarca las componentes relativas a las *herramientas de análisis*; es decir, modelos y procedimientos para predecir del deterioro de pavimentos; la evaluación de políticas y proyectos de conservación; mejoramiento, formulación y optimización de programas de obra; y evaluación del impacto de distintas estrategias de desarrollo carretero en el comportamiento de la red.

Por lo anterior, el HDM-4 puede considerarse un producto de gran utilidad para la integración de sistemas de gestión de pavimentos, ya que provee varias de las componentes más importantes de los mismos. Sin embargo, es necesario enfatizar que el HDM-4 no puede constituir por sí sólo un sistema de gestión de pavimentos al carecer de componentes esenciales, como el manejador de bases de datos¹ y de otras que no pueden implementarse a través de un sistema de

¹ Aunque el HDM-4 cuenta con un manejador de bases de datos, éste no ha sido diseñado para cumplir las funciones de los sistemas institucionales de gestión de información que requieren los sistemas de gestión de

cómputo; por ejemplo sistema de referencia o los procedimientos y previsiones institucionales para levantamiento y actualización de datos.

1.3 Desarrollo histórico del modelo HDM

A finales de la década de los 60s, el Instituto Tecnológico de Massachussets desarrolló por encargo del Banco Mundial, un modelo denominado *Modelo de Costos para Carreteras (Highway Cost Model, HCM)*. A pesar de que se trató de un modelo conceptual y no de una herramienta de cálculo propiamente dicha, a menudo se considera al HCM como la primera versión del HDM.

En el HCM se propuso utilizar como criterio para evaluación de proyectos carreteros la minimización del *costo total de transporte*; el cual se obtiene como la suma de los montos de construcción y conservación de la infraestructura, y los relativos a los usuarios, para un periodo de tiempo dado.

En la primera mitad de la década de los setentas, el TRRL y el Banco Mundial auspiciaron un estudio de campo a gran escala en Kenia, que permitió un conjunto de relaciones para estimar el deterioro de carreteras y los costos de operación vehicular. Estas relaciones se utilizaron en el modelo de *estándares de diseño y conservación de carreteras (Highway Design and Maintenance Standards Model, HDM)*, que fue presentado en 1979. Entre los especialistas es común hacer referencia a esta versión específica, como *HDM-II*.

Entre 1977 y 1983, el TRRL realizó otro estudio en países del Caribe, para investigar los efectos del diseño geométrico de las carreteras en los gastos de operación vehicular. En ese mismo periodo, el Instituto Central de Investigación en Carreteras de la India (*Central Road Research Institute, CRR*), diseñó un estudio de problemas de operación de la red carretera de la India, relacionados con caminos angostos y con la circulación de tránsito no motorizado en proporciones significativas.

Patrocinado por el *Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas (United Nations Development Program, UNDP)*, se realizó de 1975 a 1984 un nuevo estudio de campo de grandes proporciones; esta vez en Brasil, cuyos resultados junto con la información y experiencias previas, se utilizaron en el HDM-III, el cual se concluyó en 1984. Paralelamente, se constituyó un modelo destinado a optimizar programas de mantenimiento de carreteras sujetos a restricciones presupuestales, el *modelo de presupuestos del gasto (Expenditure Budgeting Model, EBM)*.

Tanto el HDM-II como el HDM-III fueron concebidos originalmente para ejecutarse en computadoras tipo *mainframe*. Sin embargo, en 1989 el Banco Mundial presentó el HDM-PC, una versión del HDM-III para computadoras personales con

pavimentos. Existen tareas como la consulta o análisis de los datos de entrada que prácticamente no pueden ejecutarse en el entorno del HDM-4. 4

sistema operativo MS-DOS. Al mismo tiempo comenzó a distribuirse el programa *modelo de costos de operación de vehículos (Vehicle Operating Costs Model, VOC)*, el cual permitía calcular los montos de operación vehicular con las mismas relaciones utilizadas por el HDM-III.

En 1994 se presentó el HDM-Q, una nueva versión del modelo que incorporaba las herramientas necesarias para estimar los beneficios económicos derivados de la ampliación de tramos con problemas de congestión, y en ese mismo año apareció el *administrador del HDM (HDM Manager o HDM-ADM)*, una interfaz de usuario basada en menús con la cual se trataba de facilitar el uso del HDM.

A mediados de los noventa, más de diez años después del lanzamiento original del HDM-III, se hizo evidente la necesidad de nuevos esfuerzos orientados a la modernización del modelo, a fin de aumentar sus posibilidades de análisis, de incorporar los resultados de diversas investigaciones realizadas en varios países, y primordialmente de actualizar los programas de cómputo, los cuales seguían correspondiendo a los estándares de desarrollo de software de los años 70s y 80s.

Por otro lado, aunque el modelo se había utilizado principalmente en países en desarrollo, se identificó un uso significativo por parte de naciones industrializadas, lo cual se tradujo en la necesidad de incorporar nuevos submodelos para analizar los efectos del congestionamiento vehicular y de los climas fríos; un mayor número de tipos de pavimento; y aspectos de seguridad, y de medio ambiente.

Con estos antecedentes, y con el propósito central de actualizar el modelo HDM, se inició en 1997 el estudio ISOHDM al que se hizo referencia en el inciso 1.2; y como principal resultado del mismo, en febrero de 2000 se anunció la terminación de la versión 1.0 del HDM-4. Aunque se conservaron las siglas para identificar a las ediciones previas, el nuevo producto fue denominado *sistema de gestión y desarrollo de carreteras (Highway Development and Management System)*, retomando el nombre del estudio que le dio origen. Los derechos de comercialización del HDM-4 y del resto de los productos del estudio ISOHDM quedaron en poder de la PIARC.

La Figura 1.2 ilustra la evolución histórica del modelo HDM.

Actualmente se encuentra en el mercado la versión 1.3 del HDM-4, la cual aunque incorpora un número importante de mejoras y correcciones, no difiere significativamente de la versión original. Por otro lado, se encuentra en desarrollo la versión 2.0, misma que se espera constituya una mejora sustancial con respecto a la actual.

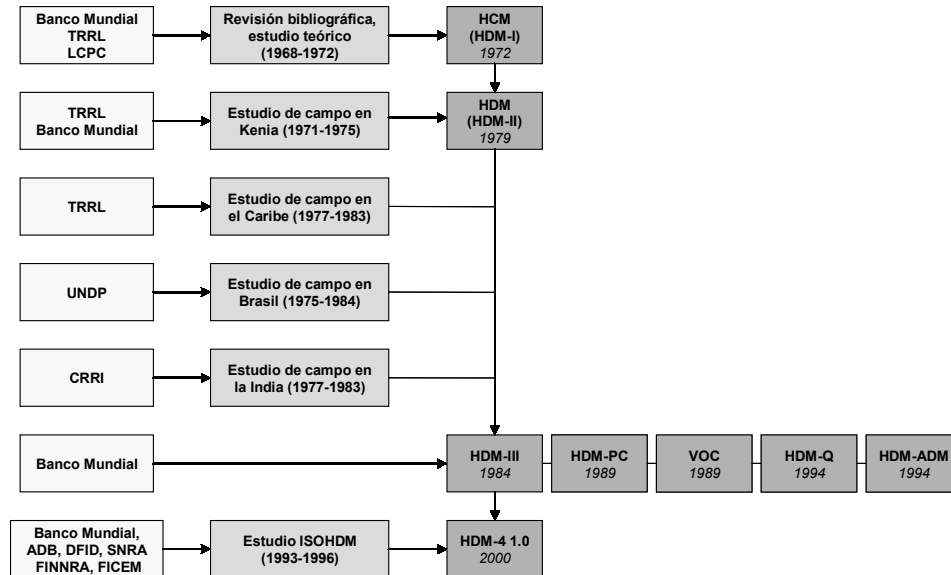


Figura 1.2
Desarrollo histórico del HDM

1.4 Importancia de la sensibilidad del HDM-4

El HDM-4 incorpora un número importante de relaciones que modelan en forma muy detallada distintos aspectos relacionados con el deterioro de los pavimentos; los costos de operación vehicular; la evaluación económica de proyectos; y la jerarquización y optimización de programas de obra.

El nivel de detalle empleado por el HDM-4 permite modelar la mayoría de los factores que intervienen en la evaluación de los proyectos viales; por ejemplo, en lo que se refiere al deterioro de pavimentos, el sistema analiza prácticamente todos los indicadores que se emplean para caracterizar este fenómeno: irregularidad, deterioros superficiales, resistencia al deslizamiento, capacidad estructural, etc.

Sin embargo, para lograr este nivel de detalle, el HDM-4 utiliza un número muy importante de variables de entrada. A fin de ilustrar este hecho, considérese que la evaluación de un proyecto de conservación con tres posibilidades para un tramo carretero de concreto asfáltico, con una flota vehicular compuesta por cinco tipos de unidades requiere unos 800 datos de entrada. Si bien, para un alto porcentaje de estos datos pueden utilizarse como primera aproximación valores por omisión definidos dentro del HDM-4; es claro que aun la revisión de estos valores para verificar que se ajusten razonablemente a los datos reales, puede significar una tarea sumamente ardua. Por otro lado, algunas de las variables para las que no es recomendable utilizar los valores por omisión, como los espesores de las capas del pavimento, resultan muy difíciles de conseguir en forma directa.

De lo ya señalado se desprende la necesidad de estudiar la sensibilidad de los modelos internos del HDM-4, a fin de jerarquizar cada uno de los parámetros que

intervienen en ellos de acuerdo con su impacto en los resultados del sistema, y generar un listado de las variables cuyos valores resulta indispensable obtener en campo o en gabinete, para garantizar que esos resultados correspondan a la realidad.

El conocimiento de la sensibilidad del HDM-4 resulta de gran utilidad no sólo para optimizar los recursos disponibles para la recopilación de información, destinándolos a conseguir variables con mayor influencia en los resultados, sino también para encausar los esfuerzos que se emprendan para la calibración de los modelos bajo condiciones nacionales, actividad que resulta imprescindible si se desea que el sistema modele en forma fidedigna las condiciones de la red carretera.

En este trabajo se decidió estudiar específicamente la sensibilidad de las relaciones utilizadas por el HDM-4 para predecir el deterioro de pavimentos asfálticos por las razones que se enumeran a continuación:

1. Los modelos matemáticos incorporados al HDM-4 son complejos, por lo cual es recomendable analizar la sensibilidad de cada grupo de modelos (deterioro, efectos de las acciones, costos de operación vehicular, etc) en forma separada.
2. Los pavimentos asfálticos tienen una participación predominante en las carreteras mexicanas, tanto en la red federal libre de peaje, como en los caminos de cuota y en las redes de jurisdicción estatal.
3. En términos generales, las dependencias que han iniciado proyectos para la implementación del HDM-4, carecen de información suficiente del diseño y el estado físico de los caminos bajo su jurisdicción, así como de otros parámetros requeridos por los modelos de deterioro para pavimentos asfálticos.
4. El grupo de modelos de deterioro del HDM-4 ofrece las mayores posibilidades de calibración y adaptación en el mediano plazo.

1.5 Trabajos previos relacionados con la sensibilidad del modelo HDM

Dados los grandes volúmenes de información involucrados en la aplicación del modelo HDM, la sensibilidad del mismo ha sido una preocupación constante de sus promotores y usuarios, por lo menos en lo que se refiere a las ediciones representadas por el HDM-III y el HDM-4.

En 1996, el Banco Mundial realizó un análisis de sensibilidad del HDM III [Archondo-Callao, 1996]. El informe correspondiente, que consta de una serie de gráficas en las que se ilustra el porcentaje de variación de los resultados originado por cambios en los datos de entrada, se enfoca principalmente al modelo de

costos de operación vehicular, aunque también presenta algunos resultados relacionados con el cálculo de la tasa interna de retorno y el pronóstico del índice internacional de irregularidad (IRI).

Con respecto a la predicción del IRI, el informe incluye dos gráficas que tratan de la importancia relativa de algunas variables que participan en el cálculo, medida en términos del periodo necesario para que el IRI se incremente de 2.0 a 4.5 m/km (Figura 1.3) y del valor final de este indicador para un periodo de análisis de 20 años (Figura 1.4).

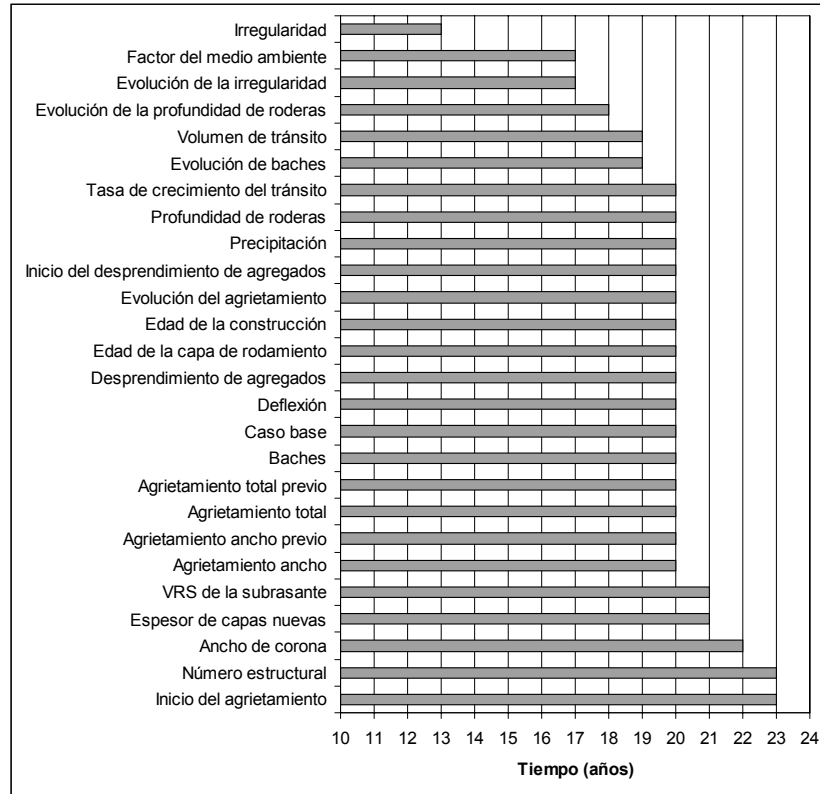


Figura 1.3

Tiempo necesario para pasar de 2.0 a 4.5 m/km de IRI con un aumento de 50% en los datos de entrada (TDPA = 3000 veh/día) [Archondo-Callao, 1996]

En lo que se refiere al HDM-4, la documentación del mismo incluye un análisis de sensibilidad que aborda tanto los Modelos de Efectos para los Usuarios (RUE) como los de deterioro y efectos de las obras (RDWE) [Bennett *et al.*, 2000].

Este análisis utiliza como medida de sensibilidad el concepto de *elasticidad del impacto*, el cual se define como la relación entre los porcentajes de cambio de un resultado específico y un dato de entrada. El análisis se basó en el enfoque *ceteris paribus*, que consiste en modificar cada parámetro por separado y obtener la sensibilidad correspondiente, manteniendo los demás parámetros constantes. Para caracterizar el nivel de influencia de cada variable, se definieron cuatro

categorías de sensibilidad en función de la elasticidad del impacto, como se muestra en la Tabla 1.1.

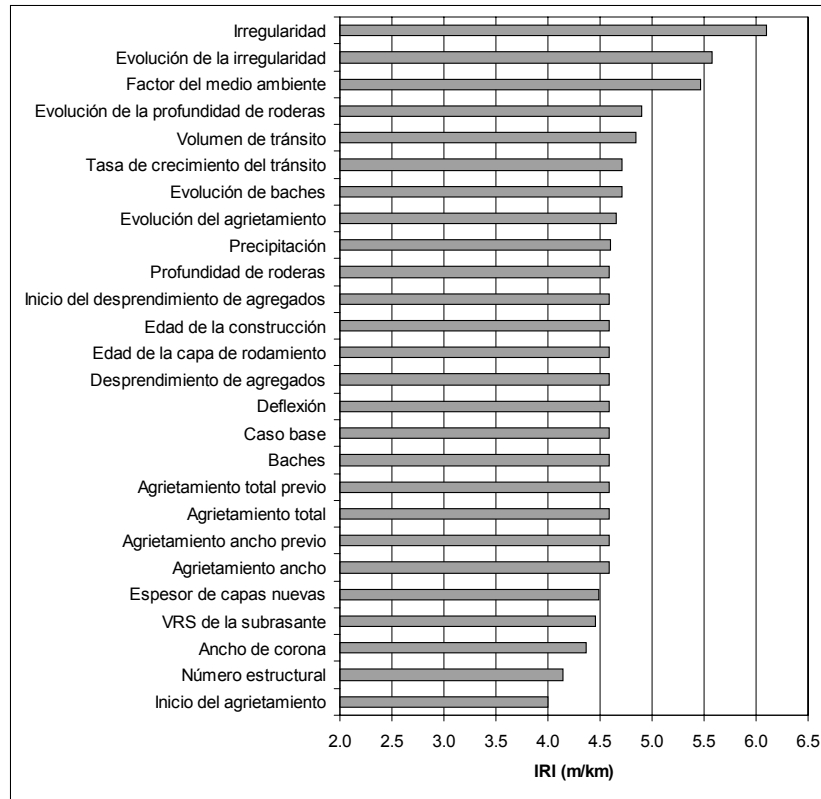


Figura 1.4

Pronóstico de IRI para 20 años, con un aumento de 50% en los datos de entrada (TDPA = 3000 veh/día, IRI inicial = 2.0 m/km) [Archondo-Callao, 1996]

Tabla 1.1
Categorías definidas para el análisis de sensibilidad del HDM-4

| Nivel de impacto | Categoría de sensibilidad | Elasticidad del impacto |
|------------------|---------------------------|-------------------------|
| Alto | S-I | > 0.50 |
| Moderado | S-II | 0.20 – 0.50 |
| Bajo | S-III | 0.05 – 0.20 |
| Muy bajo | S-IV | < 0.05 |

Debe notarse que la documentación no especifica las variables de salida para las que se calculó la sensibilidad, y sólo identifica los grupos de resultados en los que se observó el mayor impacto. En ella tampoco se señalan los porcentajes en los que se variaron los datos, ni se describen las características de la red carretera, flota vehicular o los parámetros de evaluación económica empleados en el estudio.

La Tabla 1.2 reproduce los resultados que se obtuvieron en el análisis de sensibilidad de los modelos RDWE incluido en la documentación del HDM-4.

Tabla 1.2
Resultados del análisis de sensibilidad del HDM-4, para los modelos RDWE
[Bennett *et al.*, 2000]

| Categoría de sensibilidad | Elasticidad del impacto | Parámetro | Grupos de resultados con mayor impacto | | |
|---------------------------|-------------------------|--|--|---|--|
| | | | Comportamiento del pavimento | Reposición de la capa de rodamiento, y deterioros superficiales | Beneficios económicos debidos al mantenimiento |
| S-I | > 0.50 | Número estructural | • | • | • |
| | | Número estructural modificado | • | • | • |
| | | Volumen de tránsito | | | • |
| | | Deflexión (con SN ²) | • | • | • |
| | | Irregularidad | • | | • |
| S-II | 0.20 – 0.50 | Cargas por año | • | • | • |
| | | Edad | | • | • |
| | | Área de agrietamiento total | | • | • |
| | | Área de agrietamiento ancho | | • | • |
| | | Factor ambiental de la irregularidad | • | | • |
| | | Factor de inicio del agrietamiento | • | • | • |
| | | Factor de evolución del agrietamiento | | • | |
| S-III | 0.05 - 0.20 | VRS de la subrasante (con SN) | • | | |
| | | Espesor de la capa de rodamiento (con SN) | | • | • |
| | | Número de ejes de vehículos pesados | | • | • |
| | | Área de baches | • | • | |
| | | Media de la profundidad de roderas | • | | |
| | | Desviación estándar de la profundidad de roderas | • | | |
| | | Factor de evolución de la profundidad de roderas | • | | |
| | | Factor general de la irregularidad | • | | • |
| S-IV | < 0.05 | Deflexión (con SNC ³) | | • | |
| | | Compactación de la subrasante | • | | • |
| | | Precipitación (con K _{ge}) | • | | |
| | | Área con desprendimientos | | • | |
| | | Factor de desprendimientos | | • | |

² Número estructural, por las siglas de *Structural Number*.

³ Efectos del agrietamiento en el número estructural

Nótese que aunque las metodologías empleadas en los estudios descritos para el cálculo de la sensibilidad del HDM-III y el HDM-4 no son comparables, y aunque existen diferencias importantes entre los modelos de deterioro de ambos sistemas, los resultados de los dos estudios involucran prácticamente a las mismas variables, si bien con niveles de impacto distintos.

En el año 2002, el Instituto Mexicano del Transporte realizó un estudio exploratorio de la sensibilidad del HDM-4 [Solorio, *et al.*, 2002], en el cual también se emplearon el enfoque *ceteris paribus* y el concepto de elasticidad del impacto, con un porcentaje de variación de los datos de entrada del 20%. Para evaluar los resultados que se incluyeron en el análisis, se utilizó directamente el programa de cómputo, es decir, no se programó por separado ninguno de los modelos. El ejercicio comprendió la obtención de elasticidades de impacto para RUE y RDWE.

La sensibilidad de los modelos RDWE se exploró con las combinaciones de periodos de análisis, IRI inicial y volúmenes de tránsito que se indican en la Tabla 1.3. En todos los casos, la elasticidad del impacto se calculó con base en el resultado de referencia, la irregularidad al final del periodo de análisis considerado.

Tabla 1.3
Casos analizados en el estudio exploratorio de sensibilidad del IMT

| Caso | Periodo de análisis (años) | IRI inicial (m/km) | TDPA inicial (veh/día) |
|-------------|-----------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| 1 | 5 | 2 | 7500 |
| 2 | 5 | 4 | 3000 |
| 3 | 10 | 2 | 7500 |
| 4 | 10 | 4 | 3000 |

En la Tabla 1.4 se resumen los resultados del estudio exploratorio para los modelos RDWE. Como se observa en esta tabla, se obtuvieron en general distintos niveles de sensibilidad de los parámetros para cada caso analizado. Puesto que las tres variables para definir los casos establecen en última instancia, condiciones específicas de deterioro de la carretera al momento de evaluar la sensibilidad de los modelos RDWE, puede concluirse que el impacto de los parámetros de estos sistemas varía con el nivel de deterioro del pavimento. Esta conclusión constituyó uno de los principales hallazgos del estudio exploratorio, y se retomó al definir la metodología del análisis de sensibilidad que se presenta en este trabajo.

Tabla 1.4
Resultados obtenidos para los modelos RDWE en el estudio
exploratorio de sensibilidad del IMT [Solorio, et al, 2002]

| Parámetro | Categoría de sensibilidad | | | | |
|---|---------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | Mayor | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso 4 |
| Factor de efectos estacionales (irregularidad) | S-I | S-III | S-IV | S-I | S-III |
| Factor de evolución de baches | S-I | S-IV | S-III | S-I | S-I |
| Factor de evolución de la irregularidad | S-I | S-III | S-III | S-I | S-II |
| Factor de evolución del agrietamiento ancho | S-I | S-IV | S-IV | S-I | S-IV |
| Factor de inicio del agrietamiento | S-I | S-IV | S-IV | S-I | S-IV |
| Factor de inicio del agrietamiento ancho | S-I | S-IV | S-IV | S-I | S-IV |
| Indicador de defectos para la base | S-I | S-IV | S-III | S-I | S-III |
| Indicador de defectos para la capa asfáltica | S-I | S-III | S-II | S-I | S-II |
| Irregularidad inicial (IRI) | S-I | S-I | S-I | S-II | S-I |
| Número efectivo de carriles | S-I | S-III | S-III | S-I | S-I |
| Número estructural | S-I | S-II | S-III | S-I | S-III |
| VRS de la subrasante | S-I | S-III | S-IV | S-I | S-IV |
| Factor ambiental (irregularidad) | S-II | S-III | S-III | S-II | S-II |
| Factor de evolución del agrietamiento total | S-II | S-IV | S-IV | S-III | S-II |
| Número de baches | S-II | S-IV | S-IV | S-II | S-IV |
| Área con desprendimientos de agregados | S-III | S-III | S-IV | S-IV | S-III |
| Área total agrietada | S-III | S-IV | S-IV | S-III | S-III |
| Compactación relativa | S-III | S-III | S-III | S-III | S-III |
| Factor de deformación plástica (roderas) | S-III | S-III | S-IV | S-III | S-IV |
| Factor de retraso del agrietamiento | S-III | S-IV | S-IV | S-IV | S-III |
| Porcentaje de vehículos que utilizan llantas con clavos | S-III | S-III | S-IV | S-IV | S-IV |
| Área con rotura de borde | S-IV | S-IV | S-IV | S-IV | S-IV |
| Factor de deterioro estructural (roderas) | S-IV | S-IV | S-IV | S-IV | S-IV |
| Profundidad de la textura | S-IV | S-IV | S-IV | S-IV | S-IV |
| Profundidad de roderas | S-IV | S-IV | S-IV | S-IV | S-IV |

2 Descripción del análisis

El análisis que a continuación se describe fue motivado por la necesidad de conocer el impacto de los parámetros que intervienen en los modelos de deterioro del HDM-4 para pavimentos asfálticos, tomando en cuenta la variedad de condiciones en las que pueden aplicarse.

De acuerdo con los resultados del estudio exploratorio de sensibilidad realizado por el IMT [Solorio, *et al*, 2002], el impacto de los parámetros involucrados en los modelos depende del nivel de deterioro del tramo en el momento de evaluar la sensibilidad, el cual a su vez es función de las características del pavimento; su deterioro inicial; el volumen de tránsito; el periodo de análisis considerado; y las características del medio ambiente, entre otros factores.

Para estimar la sensibilidad de los modelos de deterioro se utilizó como principal resultado de referencia el pronóstico del índice internacional de irregularidad (IRI), en virtud de que éste engloba al conjunto de indicadores del deterioro superficial y estructural del pavimento, al mismo tiempo que constituye el principal insumo para evaluar los efectos del estado de la vía sobre los usuarios.

Adicionalmente, se ha calculado la sensibilidad del pronóstico de número estructural, dada la importancia de este parámetro en el procedimiento para estimar el deterioro de pavimentos asfálticos.

En lo que sigue se abunda sobre el papel central del IRI en la metodología de análisis del HDM-4, y sobre las razones que motivaron su uso como valor de referencia primario para evaluar la sensibilidad de los modelos de deterioro. Asimismo, se explica el procedimiento de cálculo utilizado, y se describen las herramientas de cómputo desarrolladas como parte del trabajo.

2.1 Importancia del IRI en la metodología de análisis del HDM-4

La irregularidad del pavimento, expresada en términos del índice internacional de irregularidad (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 irregularidad se refiere a las imperfecciones de la superficie de la carpeta 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 irregularidad 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.

A partir de la realización de la prueba AASHO en los años 60, en varios países comenzaron a desarrollarse procedimientos y equipos para medir la irregularidad, mediante diversos índices para cuantificarla. Lo anterior dio origen a una gran variedad de métodos e indicadores, por lo que en 1982 el Banco Mundial auspició el *experimento internacional de irregularidad en carreteras (IRRE* por las siglas *International Road Roughness Experiment*), el cual reunió en Brasil un número importante de equipos para evaluar mediante análisis de campo, la correlación y equivalencia entre los distintos indicadores propuestos, así como la posible calibración de los equipos con respecto a una referencia común [Sayers, *et al*, 1986]. Esto último se logró mediante el índice internacional de irregularidad, o IRI, que desde entonces se ha convertido en un estándar mundial para conocer la irregularidad en carreteras.

El IRI es un resumen estadístico del perfil longitudinal de un camino a lo largo de una rodada, y representa los desplazamientos verticales de un vehículo de pasajeros típico que tienen su origen en la irregularidad de la superficie de rodamiento [Soliminihac, 2001]. Para ello se simula el recorrido de un cuarto de carro¹ sobre un perfil cualquiera, a una velocidad de 80 km/h; este valor se relaciona con las frecuencias de oscilación que más afectan la percepción de los usuarios con respecto a la comodidad del viaje.

La escala del IRI varía desde cero para una superficie totalmente plana hasta 20 para caminos sin pavimentar, extremadamente deteriorados. Los pavimentos en buen estado suelen tener asociados valores de IRI entre 1 y 2, mientras que los niveles máximos de daño están representados por un rango de IRI de 8 a 12. Aunque se trata de un parámetro adimensional, el IRI suele expresarse en unidades como m/km, mm/m, o pulgadas sobre milla.

La importancia del IRI como estándar internacional para la medición de la irregularidad, 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.

El IRI, además de ser una medida objetiva de la irregularidad del pavimento, constituye un indicador de su condición global, ya que en él se reflejan tanto los defectos de la superficie de rodamiento como las deformaciones permanentes de la estructura en su conjunto. De hecho, como se verá en el siguiente capítulo, el procedimiento para predicción en el HDM-4 consiste básicamente en estimar en cada año del periodo de análisis considerado, los efectos del deterioro superficial y la pérdida de capacidad estructural en el IRI. Lo anterior también justifica su uso como resultado de referencia en el análisis de sensibilidad.

Por otro lado, la correlación entre el IRI, la velocidad y los costos de operación vehicular representa una de las premisas más importantes en las que se

¹ Se refiere a una rueda con las características dinámicas asociadas de la suspensión, y la masa de la carrocería que le corresponden

fundamenta la metodología de análisis del HDM en general y del HDM-4 en particular. Esta correlación, plasmada en un conjunto de modelos que tienen su origen en los diversos estudios de campo en las décadas de los 70s y 80s (ver capítulo 1), simplifica considerablemente el análisis de los efectos de la condición del pavimento sobre la dinámica vehicular al expresar la primera en términos de un sólo indicador, y explica por qué el fin último de los modelos RDWE consiste en evaluar el impacto de los distintos modos de deterioro en el IRI.

La metodología de análisis empleada por el HDM-4 para evaluar alternativas de inversión en proyectos vehiculares, se basa en la comparación de los costos de las acciones para mejorar la condición de los pavimentos, con los beneficios producidos por esas acciones, los cuales en una proporción significativa, corresponden a ahorros en los gastos de operación vehicular. Tomando en cuenta la correlación que existe entre estas erogaciones y el IRI, se concluye que este parámetro es de una importancia primordial en el funcionamiento del sistema, lo que constituye otro elemento de justificación para su elección como principal resultado de los modelos de deterioro en la evaluación de la sensibilidad de los mismos.

En la Figura 2.1 se ilustra la importancia del IRI dentro de la metodología de análisis del HDM-4.

2.2 Análisis del número estructural y cálculo de las velocidades de operación del tránsito

El número estructural constituye uno de los factores con mayor influencia en la predicción del IRI, ya que modela la capacidad del pavimento para resistir las cargas del tránsito; por tanto, representa una medida de la susceptibilidad de la superficie de rodamiento a los deterioros provocados por la deformación de las capas inferiores. Debido a la cantidad de parámetros involucrados en el cálculo del número estructural, se decidió analizar por separado la sensibilidad del modelo utilizado por el sistema para su pronóstico.

Entre los datos más importantes que se requieren para encontrar el número estructural, figuran las condiciones climáticas y el estado del drenaje, los cuales se ingresan al programa de manera cualitativa mediante una serie de categorías, que dentro del programa de cómputo dan lugar a seleccionar un conjunto de coeficientes con un gran impacto en los resultados.

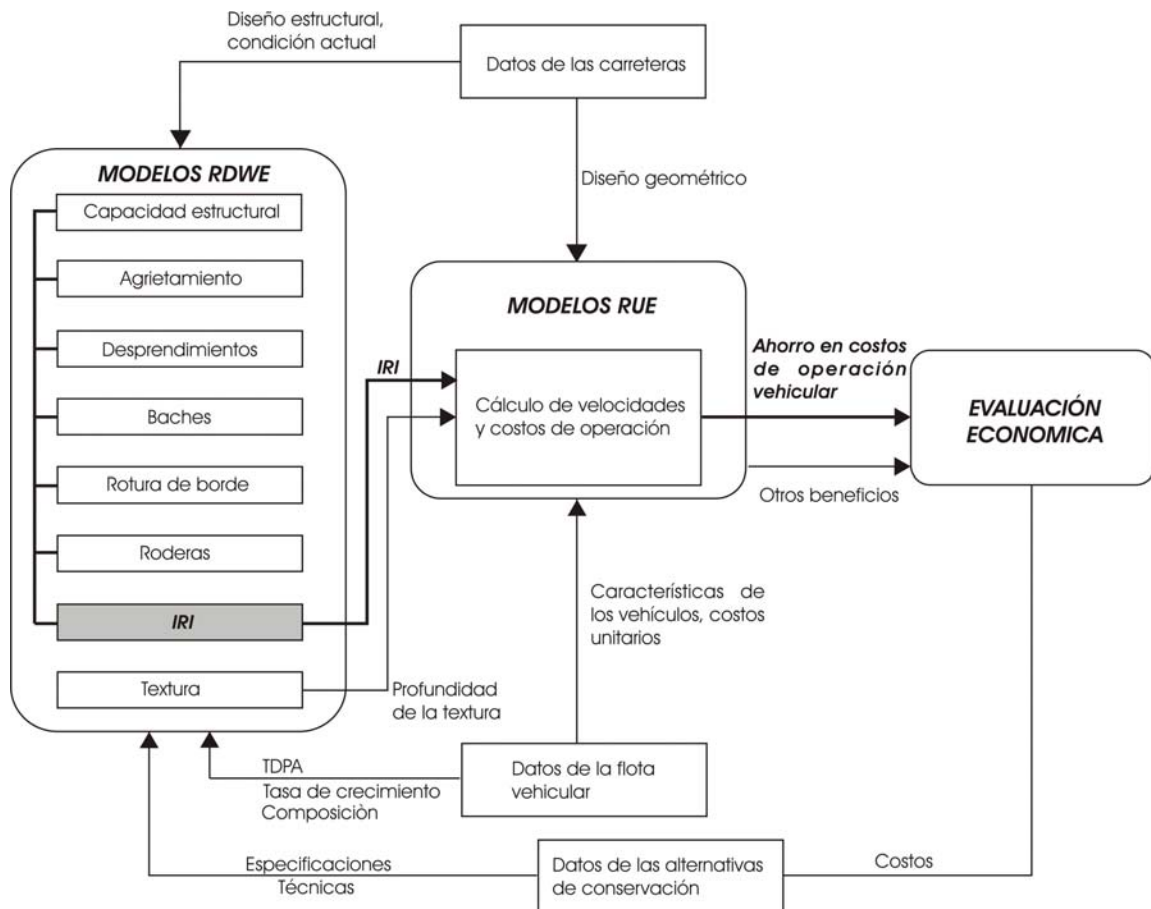


Figura 2.1
Importancia del IRI en el esquema general de análisis del HDM-4

Por otro lado, al definir los alcances del proyecto se decidió limitar el estudio de los modelos del sistema, exclusivamente al grupo relacionado con la estimación del deterioro de pavimentos asfálticos. Sin embargo, luego de revisar con detalle este grupo de modelos se descubrió que el cálculo de la componente de la profundidad de roderas relacionada con la deformación plástica, utiliza como dato de entrada la velocidad media del tránsito pesado. Para definir este último parámetro se requiere la aplicación completa del subconjunto de modelos empleados por el sistema para determinar las velocidades de operación del tránsito, el cual constituye una parte sustancial de los modelos RUE. A pesar de lo originalmente planteado, y a fin de aplicar en forma consistente los sistemas de deterioro se decidió incluir el estudio de los modelos de velocidad en los alcances del proyecto.

2.3 Procedimiento para el cálculo de la sensibilidad

Los análisis paramétricos o de sensibilidad evalúan el impacto de las variables de entrada de un modelo matemático sobre los resultados del mismo. Como se mencionó capítulo 1, el HDM-4 utiliza un número muy importante de datos de entrada; muchos de los cuales se obtienen mediante levantamientos en campo

cuyos costos resultan frecuentemente prohibitivos para las dependencias encargadas de la operación de carreteras en el país.

Por lo anterior, resulta indispensable jerarquizar las variables del HDM-4 de acuerdo con su impacto en las predicciones de los modelos, a fin de destinar los recursos disponibles a la recopilación de los parámetros que producen las mayores variaciones en los resultados del sistema.

En este trabajo se analizó la sensibilidad de los modelos de deterioro del HDM-4 para pavimentos asfálticos, y específicamente por las razones expuestas en los incisos anteriores, la de las predicciones relativas a la evolución del IRI y el número estructural.

La investigación respectiva retomó el enfoque *ceteris paribus* empleado en el análisis de sensibilidad que se incluye como parte de la documentación del HDM-4 [Bennett, *et al.*, 2000]; consiste en modificar por separado cada parámetro del modelo analizado, y evaluar su impacto en un resultado de referencia, manteniendo constantes los demás parámetros.

En el enfoque *ceteris paribus*, el impacto de los parámetros depende en términos generales, de los siguientes factores: a) el parámetro considerado, su valor inicial, y su porcentaje de variación; b) el resultado de referencia; c) los valores asignados al resto de los parámetros.

Con el propósito de tomar en cuenta los factores anteriores, los datos de entrada de los modelos se modificaron cubriendo un rango de variación relativamente amplio. Asimismo, se obtuvieron valores de sensibilidad para predicciones de los resultados de referencia (IRI, o número estructural) correspondientes a periodos comprendidos entre 1 y 20 años. Lo anterior permitió además, evaluar la influencia del deterioro del pavimento en los valores de sensibilidad obtenidos.

Como alternativa a los análisis del tipo *ceteris paribus*, la documentación del HDM-4 consigna un enfoque alternativo basado en la realización de *experimentos con factores*, los cuales consisten en combinar todos los posibles valores de un factor (parámetro) con los factores restantes [Bennett *et al.*, 2000]. Sin embargo, de acuerdo con la misma documentación, este enfoque resulta difícil de aplicar en el caso del HDM-4, debido al enorme número de combinaciones que sería necesario considerar.

En el presente estudio, los niveles de sensibilidad asociados a cada parámetro se cuantificaron mediante el concepto de *elasticidad del impacto*, introducido en el capítulo 1, cuya definición formal es:

$$EI = \frac{\Delta R}{\Delta D}$$

donde:

EI elasticidad del impacto

| | |
|------------|--|
| ΔR | porcentaje de cambio en el resultado de referencia |
| ΔD | porcentaje de cambio en el parámetro de entrada |

Para ilustrar este concepto, considérese que si un incremento de 10% en las cargas del tránsito produce un aumento de 2.9% en el pronóstico de crecimiento del IRI para un periodo de análisis de 10 años, la elasticidad del impacto de este resultado con respecto al cambio introducido en las cargas vehiculares, será de 0.29. En los casos en los que se obtiene una disminución del resultado analizado, el valor de la elasticidad del impacto se considera negativo, aunque para efectos de clasificación, se toma el valor absoluto.

Como base para la clasificación de los parámetros con respecto a la elasticidad del impacto, se utilizaron las mismas categorías definidas en el estudio de sensibilidad del HDM-4, que se incluye en la documentación del sistema (Tabla 2.1).

Con base en lo señalado, el procedimiento para evaluar la sensibilidad de los pronósticos de IRI y el número estructural, puede resumirse en los siguientes pasos:

1. Definir las condiciones del análisis, asignando valores iniciales a todas las variables requeridas por el sistema.
2. Elegir un parámetro.
3. Utilizando el valor inicial del parámetro, calcular el pronóstico del resultado de referencia para periodos comprendidos entre 1 y 20 años.
4. Variar el parámetro elegido en un porcentaje determinado.
5. Repetir el cálculo del punto 3 con el nuevo valor del parámetro.
6. Calcular el valor de elasticidad del impacto correspondiente a cada periodo.
7. Repetir los pasos 4 a 6 para distintos porcentajes de variación, en un rango tal que permita identificar el comportamiento de la sensibilidad del resultado de referencia con respecto al parámetro elegido, y al mismo tiempo sea compatible con el rango de valores admitidos para el parámetro dentro del HDM-4².
8. Repetir los pasos 2 a 7 hasta concluir el análisis de todos los parámetros que intervienen en los modelos de deterioro para pavimentos asfálticos.

² Originalmente, se propuso variar todos los parámetros en un rango de -50% a 50%. Sin embargo, este rango resultó o bien demasiado estrecho o bien demasiado amplio para evaluar el impacto de algunos parámetros.

En el diagrama de flujo de la Figura 2.2 se representa gráficamente el procedimiento anterior.

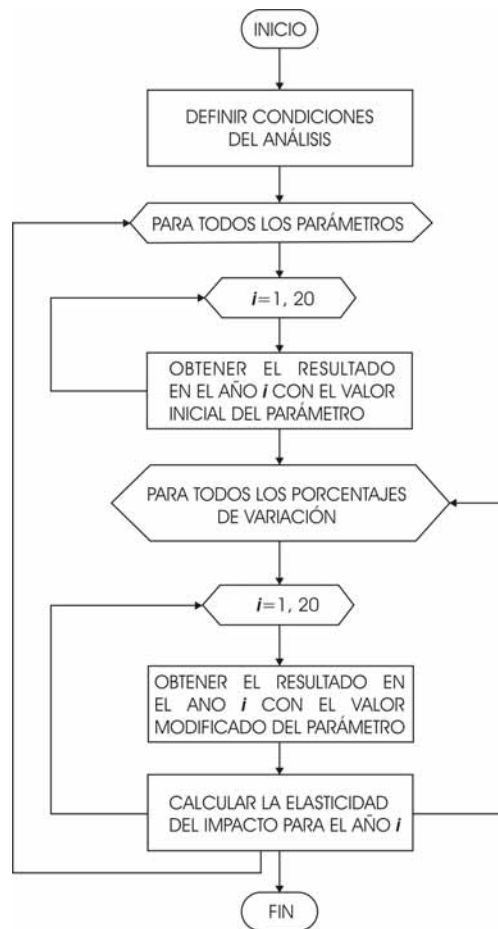


Figura 2.2
Diagrama de flujo del procedimiento empleado para el análisis de sensibilidad

Con respecto a las condiciones iniciales, el inciso 2.4 contiene una descripción de los casos utilizados como base en el análisis de sensibilidad. Dados los volúmenes de cálculo involucrados en la metodología propuesta, se decidió considerar únicamente dos tipos de pavimento y una zona climatológica. Sin embargo, el procedimiento es aplicable al análisis de cualquier combinación de valores iniciales para los datos de entrada.

Empleando el procedimiento descrito, se elaboraron para cada parámetro involucrado en los resultados de referencia analizados, gráficas de sensibilidad como la de la Figura 2.3.

Dichas gráficas se componen de familias de curvas en las que las ordenadas corresponden al pronóstico del resultado de referencia para cada periodo, y las

ordenadas a valores de elasticidad del impacto. Las curvas unen los puntos para cada uno de los porcentajes en los que se modificaron los parámetros. El arreglo anterior permite apreciar la influencia del porcentaje de variación de los datos de entrada, y del nivel de deterioro del pavimento en la sensibilidad del resultado de referencia.

La clasificación de los parámetros de acuerdo con su impacto se hizo utilizando los valores de elasticidad máximos o mínimos de las curvas envolventes.

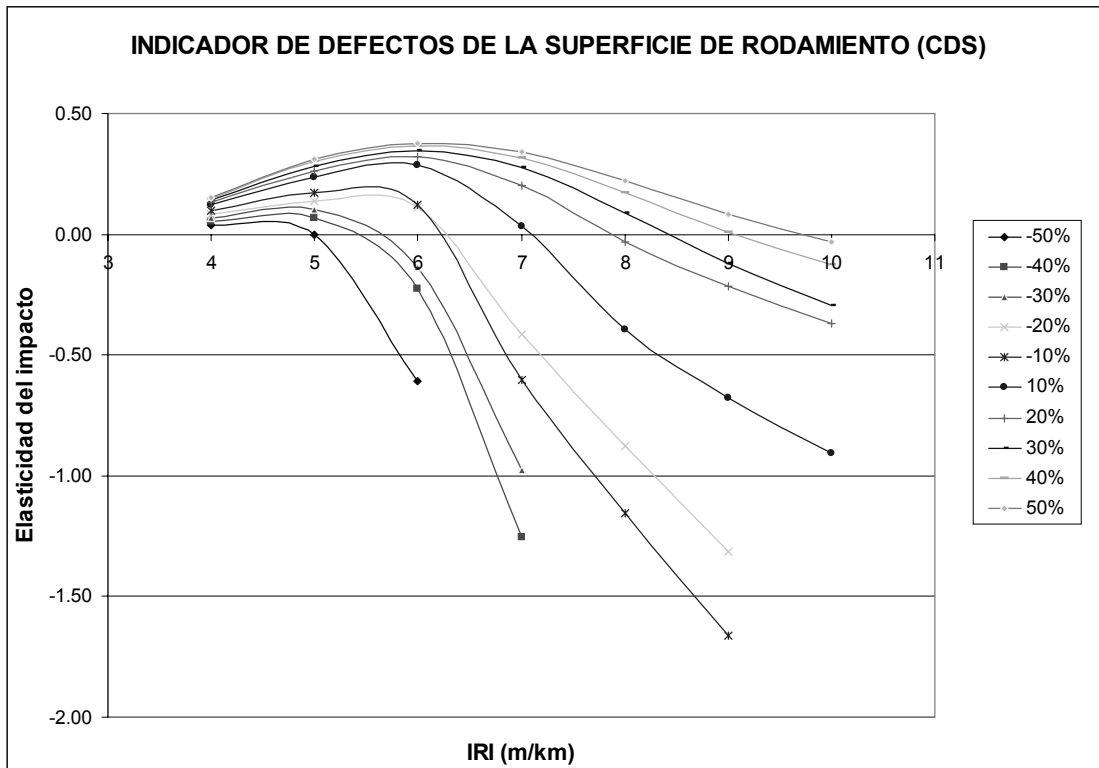


Figura 2.3
Gráfica de sensibilidad

El capítulo 3 incluye una discusión de los valores de elasticidad del impacto obtenidos para cada uno de los parámetros analizados.

2.4 Descripción de los casos de análisis

Para aplicar el procedimiento descrito en 2.3, se definió un tramo de 1 km de longitud, recto y plano, con flujo vehicular libre³ y con el diseño básico de sección que se muestra en la Figura 2.4. No se consideraron deterioros iniciales a fin de observar la evolución de cada tipo de daño, en todo su rango de variación.

Con base en el tramo anterior se integraron tres casos de análisis, diferenciados por el nivel de tránsito, los materiales de las capas constitutivas, y la existencia previa de una carpeta asfáltica. Los factores anteriores se asocian con variantes

³ Es decir, sin problemas de capacidad vial.

de los modelos y con coeficientes específicos, cuyo impacto se consideró necesario explorar aunque debe aclararse que no se analizaron en forma exhaustiva todas las variantes contempladas en los modelos, las cuales en términos generales corresponden a los distintos tipos de pavimentos asfálticos que pueden modelarse dentro del HDM-4.

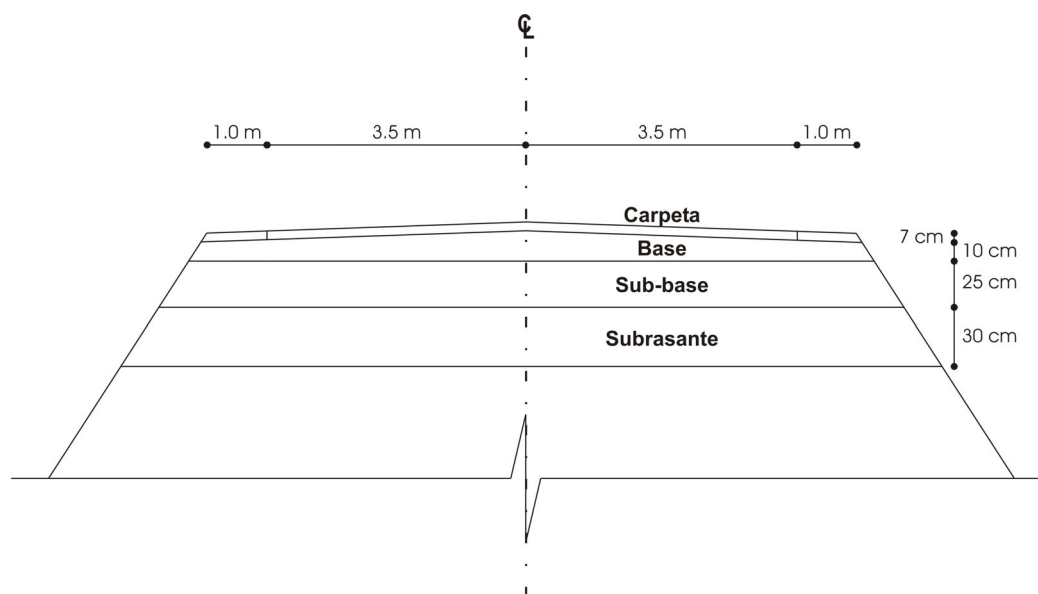


Figura 2.4
Sección básica utilizada en el análisis

La Tabla 2.1 agrupa los parámetros que definen los casos de análisis propuestos. Como se aprecia en esta tabla, se incluyeron dos tipos de pavimento: carpeta asfáltica sobre base granular y carpeta asfáltica sobre base estabilizada con asfalto. Los niveles de tránsito se eligieron de manera que fuesen razonablemente compatibles con la estructura de pavimento que corresponde a cada caso. Para uno de los pavimentos con base granular, se introdujo como variante la existencia previa de una carpeta asfáltica.

Tabla 2.1
Definición de los casos de análisis

| Parámetro | | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 |
|----------------------------|----------|---------------------------------------|---|---------------------------------------|
| TDPA (veh/día) | | 3000 | 7500 | 1500 |
| Tipo de pavimento | | Carpeta asfáltica sobre base granular | Carpeta asfáltica sobre base estabilizada con asfalto | Carpeta asfáltica sobre base granular |
| Espesor de la carpeta (mm) | Nuevo | 70 | 70 | 70 |
| | Anterior | 0 | 0 | 50 |

Cabe hacer notar que en el análisis de los tres casos, se emplearon los mismos datos de flota vehicular y condiciones climatológicas.

La flota vehicular se integró con los siete tipos de unidades aforados anualmente por la Dirección General de Servicios Técnicos de la SCT en la red federal de

carreteras. En todos los casos, se utilizó la composición definida en la Tabla 2.2, la cual a grandes rasgos puede considerarse representativa del flujo en las vías de la red federal. Con relación a las características físicas de cada vehículo, se retomó la información de la Publicación Técnica 202 del IMT [Arroyo, et al., 2001]. Los coeficientes de daño necesarios para calcular el número estructural se obtuvieron con base en los límites de peso bruto vehicular y cargas por eje establecidos en el Reglamento de Pesos y Dimensiones de la SCT vigente [SCT, 2002].

Tabla 2.2
Composición vehicular utilizada en el análisis

| Tipo de vehículo | Porcentaje (%) |
|------------------------------|-----------------------|
| Vehículo ligero | 70 |
| Autobús | 8 |
| Camión mediano C2 | 12 |
| Camión pesado C3 | 7 |
| Camión articulado (T3-S2) | 2 |
| Camión articulado (T3-S3) | 0.8 |
| Camión articulado (T3-S2-R4) | 0.2 |

Se hicieron dos consideraciones de carga para los vehículos pesados, la cual modifica los valores de los coeficientes de daño utilizados, la primera de ellas suponía un porcentaje de la flota de vehículos pesados, cargados al 100 por ciento de su capacidad máxima permisible, y el resto vacíos; la segunda suponía la totalidad de la flota de vehículos pesados, cargados a diferentes niveles de su carga máxima permisible.

En lo que se refiere a la información climatológica, se emplearon los datos correspondientes al clima definido en el HDM-4 como *templado semihúmedo*, en virtud de que éste corresponde en términos generales, a las condiciones ambientales medias del país.

El inicio del periodo de análisis se fijó en el año 2005.

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 la definición de los casos de análisis y con las características generales de las carreteras mexicanas.

2.5 Programación de los modelos en VBA de Excel

El procedimiento de análisis descrito, se aplicó utilizando un conjunto de programas de cómputo desarrollados en *Visual Basic for Applications (VBA)* de Excel. Entre las factores que motivaron la elección de esta alternativa en lugar del uso del software, pueden mencionarse las siguientes:

1. La realización del análisis planteado requeriría un gran número de corridas del HDM-4.
2. Para obtener cada una de las series de elasticidades del impacto, sería necesario navegar por una parte importante de las ventanas y cuadros de diálogo del sistema.
3. En cualquier caso, se requeriría el uso de una hoja de cálculo para integrar los productos del análisis de sensibilidad a partir de los resultados de las corridas.
4. Las herramientas de exportación de datos del HDM-4 generan archivos con un formato que dificulta considerablemente el procesamiento de la información.
5. La tarea de reprogramar los modelos permitiría comprender mejor los detalles e interrelaciones de los mismos, así como el comportamiento individual de cada parámetro.
6. El código de programación generado podría reutilizarse en proyectos de desarrollo de sistemas de gestión pavimentos.

Para los programas de cómputo se utilizó como referencia el manual del sistema dedicado al marco de análisis y la descripción de los modelos internos [Odoki, *et al.*, 2000]. En general, se programaron los sistemas de deterioro de pavimentos asfálticos del capítulo 3, y por las razones expuestas en el inciso 2.2, el subconjunto de los modelos RUE correspondiente al cálculo de las velocidades del tránsito.

Para validar los programas se hicieron corridas simultáneas con la herramienta desarrollada y con el HDM-4, bajo distintas condiciones. Esto permitió depurar errores, y en última instancia garantizar que la herramienta produce resultados equivalentes a los del software del sistema.

En la Tabla 3.3 se muestra un ejemplo del resumen final de resultados para cada parámetro, el cual se utiliza en la construcción de gráficas de sensibilidad como en la Figura 2.3.

| AÑO | IRI ₀ | PORCENTAJES DE VARIACION DEL PARÁMETRO DE ENTRADA | | | | | | | | | |
|------|------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | -50% | -40% | -30% | -20% | -10% | 0% | 10% | 20% | 30% | 40% |
| | | VALORES DE IRI PARA EL PARÁMETRO MODIFICADO | | | | | | | | | |
| 2003 | 3.78 | 3.72 | 3.72 | 3.73 | 3.74 | 3.76 | 3.78 | 3.81 | 3.84 | 3.87 | 3.91 |
| 2004 | 4.10 | 4.02 | 4.00 | 4.01 | 4.03 | 4.06 | 4.10 | 4.16 | 4.23 | 4.31 | 4.39 |
| 2005 | 4.47 | 4.42 | 4.35 | 4.34 | 4.36 | 4.41 | 4.47 | 4.56 | 4.66 | 4.78 | 4.90 |
| 2006 | 4.89 | 4.83 | 4.76 | 4.75 | 4.76 | 4.81 | 4.89 | 5.00 | 5.14 | 5.29 | 5.46 |
| 2007 | 5.37 | 5.57 | 5.20 | 5.18 | 5.20 | 5.27 | 5.37 | 5.51 | 5.67 | 5.86 | 6.07 |
| 2008 | 5.90 | 7.20 | 6.18 | 5.99 | 5.70 | 5.78 | 5.90 | 6.07 | 6.28 | 6.51 | 6.75 |
| 2009 | 6.52 | 11.11 | 8.48 | 7.63 | 6.73 | 6.71 | 6.52 | 6.72 | 6.96 | 7.23 | 7.53 |
| 2010 | 7.70 | 16.00 | 13.47 | 11.11 | 8.81 | 8.45 | 7.70 | 7.47 | 7.75 | 8.07 | 8.41 |
| 2011 | 9.87 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 13.06 | 11.86 | 9.87 | 9.00 | 9.18 | 9.06 | 9.45 |
| 2012 | 14.03 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 14.03 | 11.80 | 11.63 | 10.87 | 11.21 |
| 2013 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 13.93 | 14.09 |
| 2014 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 |
| 2015 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 |
| 2016 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 |
| 2017 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 |
| 2018 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 |
| 2019 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 |
| 2020 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 |
| 2021 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 |
| 2022 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 | 16.00 |

| | ELASTICIDADES DEL IMPACTO | | | | | | | | | |
|------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|--|-------|-------|-------|-------|
| 2003 | 0.03 | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | | 0.07 | 0.08 | 0.09 | 0.09 |
| 2004 | 0.04 | 0.06 | 0.08 | 0.10 | 0.11 | | 0.14 | 0.15 | 0.16 | 0.17 |
| 2005 | 0.02 | 0.07 | 0.10 | 0.12 | 0.15 | | 0.19 | 0.21 | 0.23 | 0.24 |
| 2006 | 0.02 | 0.07 | 0.10 | 0.13 | 0.17 | | 0.23 | 0.25 | 0.27 | 0.29 |
| 2007 | -0.08 | 0.08 | 0.12 | 0.15 | 0.19 | | 0.26 | 0.28 | 0.31 | 0.33 |
| 2008 | -0.44 | -0.12 | -0.05 | 0.17 | 0.21 | | 0.29 | 0.32 | 0.34 | 0.36 |
| 2009 | -1.41 | -0.75 | -0.57 | -0.17 | -0.30 | | 0.30 | 0.34 | 0.37 | 0.39 |
| 2010 | -2.16 | -1.87 | -1.48 | -0.72 | -0.97 | | -0.30 | 0.04 | 0.16 | 0.23 |
| 2011 | -1.24 | -1.55 | -2.07 | -1.62 | -2.02 | | -0.88 | -0.35 | -0.27 | -0.11 |
| 2012 | -0.28 | -0.35 | -0.47 | -0.70 | -1.40 | | -1.59 | -0.86 | -0.75 | -0.50 |
| 2013 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | 0.00 | 0.00 | -0.43 | -0.30 |
| 2014 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2015 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2016 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2017 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2018 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2019 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2020 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2021 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2022 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

Tabla 2.3
Resumen del análisis de sensibilidad obtenido con la herramienta desarrollada en VBA de Excel

3 Estimación del deterioro de pavimentos asfálticos en el HDM-4

Se presenta una descripción de los modelos empleados por el HDM-4 para estimar el deterioro de pavimentos asfálticos, la cual se basa enteramente en las partes de la documentación del sistema en las que se trata este tema [Odoki, 2000]. A manera de introducción, se mencionan los factores que provocan la degradación de los pavimentos; se enumeran los tipos de pavimento y deterioros considerados; y se esboza el procedimiento empleado por el sistema para la aplicación de los modelos.

Cabe aclarar que este capítulo aborda de manera general la modelación del deterioro de pavimentos asfálticos en el HDM-4; para una descripción detallada se recomienda consultar el manual del sistema dedicado a la descripción de los modelos.

3.1 Causas del deterioro de pavimentos

Entre los principales factores que determinan el deterioro de los pavimentos, pueden mencionarse:

- Aspectos climatológicos
- Solicitaciones del tránsito
- Historial de reparaciones del pavimento
- Diseño geométrico
- Diseño estructural

En los siguientes párrafos se describen a grandes rasgos las variables utilizadas por el HDM-4 para modelar el impacto de los factores anteriores.

Factores climatológicos

El HDM-4 incorpora al análisis los aspectos climatológicos mediante parámetros relacionados con la humedad y la temperatura, los cuales se establecen a partir de las Tablas 3.1 y 3.2. Para caracterizar las condiciones de humedad se utilizan variables que describen la precipitación y la humedad libre en la zona de estudio, mientras que las condiciones de temperatura se especifican con base en promedios anuales, rangos de variación mensual y número de días con temperaturas por arriba de un cierto límite.

Específicamente, el sistema considera los siguientes parámetros relacionados con la humedad, además de la precipitación media mensual.

Índice de humedad. Este parámetro está basado en el índice de Thornthwaite e indica que tan seco o húmedo es una zona climática determinada.

Duración de la estación seca. Este indicador divide al año en dos estaciones y se indica como fracción del mismo.

En lo que se refiere a la temperatura, incluyendo a la temperatura media mensual, el HDM-4 utiliza las siguientes variables:

Rango promedio de temperaturas. Es el rango que comprende todas las temperaturas medias mensuales del año, o la diferencia entre la máxima y la mínima temperatura media mensual, de cada uno de los meses del año.

Días con temperaturas mayores a 32° C. Número de días en el año, en los cuales la temperatura ambiente excede los 32° C.

Tabla 3.1
Clasificación por humedad

| Categoría | Precipitación media anual (mm) |
|------------------|---------------------------------------|
| Árido | < 300 |
| Semiárido | De 300 a 800 |
| Subhúmedo | De 800 a 1600 |
| Húmedo | De 1500 a 3000 |
| Muy húmedo | > 2400 |

Tabla 3.2
Clasificación por temperatura

| Categoría | Promedio anual de rangos de temperatura (°C) |
|----------------------------|---|
| Tropical | 20 a 35 |
| Subtropical cálido | -5 a 45 |
| Subtropical frío | -10 a 30 |
| Templado frío | -20 a 25 |
| Templado con congelamiento | -40 a 20 |

Representación del tránsito

El HDM-4 utiliza los siguientes parámetros para representar el tránsito:

1. Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA). En el caso de caminos con un carril por sentido, se calcula como el total del tránsito aforado en los dos sentidos del tramo en estudio, dividido entre los 365 días del año. En carreteras con más de un carril por sentido, suele calcularse el TDPA que corresponde a cada sentido.
2. Composición vehicular. Se expresa en términos de los porcentajes de participación de los diferentes tipos de vehículos que utilizan el camino, con respecto al TDPA.
3. Tasa de crecimiento. Normalmente, corresponde a un porcentaje de incremento anual del TDPA.
4. Número total de ejes. Es el número total de ejes que cruzan determinada sección del tramo en estudio durante un año. Se calcula con la expresión:

$$YAX = \sum_{k=1}^K \frac{T_k \text{ NUM_AXLES}_k}{\text{ELANES} * 10^6}$$

donde:

| | |
|--------------------------|---|
| YAX: | número total anual de ejes |
| K : | número de tipos de vehículo considerados |
| T_k : | volumen anual de tránsito del vehículo tipo k |
| NUM_AXLES _k : | número de ejes por vehículo tipo k |
| ELANES : carretera | número efectivo de carriles en la sección |

5. Ejes equivalentes. En el HDM-4 se definen como el número total de aplicaciones de un eje sencillo dual estándar de 80 kN, que provocarían el mismo daño al camino, durante un año, que los ejes del vehículo considerado. Para su cálculo se utilizan factores de carga de eje equivalente estándar (*ESALF*, por las siglas *Equivalent Standard Axle Load Factor*), los cuales se calculan con la expresión:

$$ESALF_k = \sum_{i=1}^{I_k} \frac{P_{ki}}{100} \sum_{j=1}^{J_k} \left(\frac{AXL_{kij}}{SAXL_j} \right)^{LE}$$

donde:

| | |
|----------------------|---|
| ESALF _k : | factor de eje de carga equivalente estándar para el vehículo tipo k, en ejes equivalentes |
| I _k : | número de subgrupos i (definidos por rango de carga) para el vehículo tipo k. Nótese que i puede representar a cada vehículo individual |

| | |
|---------------|--|
| P_{ki} : | porcentaje de unidades en el subgrupo i del vehículo tipo k . Si i representa cada vehículo individual, entonces $P_{ki} = 100\%$ |
| LE : | exponente de equivalencia de carga. El valor por omisión utilizado es de 4.0 |
| J_k : | número de ejes sencillos para el vehículo tipo k |
| AXL_{kij} : | carga promedio en el eje j del rango de carga i en el vehículo tipo k |
| $SAXL_j$: | carga estándar del eje tipo j , por ejemplo, 6.6 t para eje sencillo con rueda sencilla, 8.16 t para eje sencillo con rueda doble, etc |

El total anual de ejes equivalentes, se calcula como:

$$YE4 = \sum_{k=1}^K \frac{T_k \text{ ESALF}_k}{\text{ELANES} * 10^6}$$

donde:

$YE4$: número anual de ejes equivalentes (millones por carril)

Historial de reparaciones

Se refiere a las acciones de mantenimiento, rehabilitación y construcción que se han efectuado en el camino a lo largo del tiempo. El HDM-4 toma en cuenta este factor mediante los siguientes parámetros relacionados con la antigüedad de los trabajos:

$AGE1$: Tiempo transcurrido en años desde el último tratamiento preventivo, sello, sobrecarpeta, reconstrucción o construcción nueva

$AGE2$: Tiempo transcurrido en años desde el último sello, sobrecarpeta, reconstrucción o construcción nueva

$AGE3$: Tiempo transcurrido en años desde la última sobrecarpeta, reconstrucción o construcción nueva

$AGE4$: Tiempo transcurrido en años desde la última reconstrucción, o construcción nueva

Diseño geométrico

En este rubro se incluyen parámetros como los anchos de carril y acotamientos, el alineamiento horizontal (expresado en términos de la curvatura media del tramo, y el promedio de la sobrelevación en curvas), y el alineamiento vertical

(caracterizado por el número de ascensos y descensos en el tramo, y el desnivel medio del mismo)

Características estructurales del pavimento

La capacidad estructural del pavimento se define mediante variables como número estructural, deflexiones, espesores de las capas, tipos de material y rigidez de la subrasante.

3.2 Tipos de pavimento considerados

Los modelos de deterioro del HDM-4 permiten analizar el comportamiento de una amplia gama de pavimentos asfálticos. Para ello, se utilizan variantes de los modelos específicos en la estimación de cada tipo de daño, o se modifican los coeficientes de los mismos. El HDM-4 clasifica los pavimentos asfálticos en función del tipo de superficie y del tipo de base, como puede apreciarse en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3
Clasificación de los pavimentos asfálticos en el HDM-4

| Tipo de pavimento | Tipo de superficie | Tipo de Base | Descripción |
|-------------------|--------------------|--------------|---|
| AMGB | AM | GB | Mezcla asfáltica sobre base granular |
| AMAB | | AB | Mezcla asfáltica sobre base asfáltica |
| AMSB | | SB | Mezcla asfáltica sobre base estabilizada |
| AMAP | | AP | Mezcla asfáltica sobre pavimento asfáltico |
| STGB | ST | GB | Tratamiento superficial sobre base granular |
| STAB | | AB | Tratamiento superficial sobre base asfáltica |
| STSB | | SB | Tratamiento superficial sobre base estabilizada |
| STAP | | AP | Tratamiento superficial sobre pavimento asfáltico |

3.3 Tipos de deterioro

El HDM-4 modela el deterioro de pavimentos mediante los siguientes tipos:

Deterioros superficiales

En esta categoría se incluyen:

- Agrietamiento
- Desprendimientos
- Baches
- Rotura de borde.

De los deterioros anteriores, los tres primeros se caracterizan por dos fases, denominadas *de inicio* y *de progreso*. La fase de inicio se refiere al lapso de tiempo previo al desarrollo de un determinado tipo de deterioro. La fase de progreso comprende el periodo durante el cual se incrementa el área afectada y la magnitud del deterioro. La rotura de borde se modela considerando únicamente la fase de progreso.

Deterioros relacionados con la deformación del pavimento

En el HDM-4, la deformación de la estructura del pavimento se modela con:

- Roderas
- Irregularidad

Se considera que este tipo de deterioros varían en forma continua, por lo que sólo se modelan mediante ecuaciones de progreso.

Deterioros relacionados con la textura superficial

Están relacionados con la capacidad del pavimento para evitar el deslizamiento de vehículos, particularmente en presencia de agua sobre la superficie. Para evaluar el estado del pavimento en este rubro, el HDM-4 utiliza los siguientes indicadores:

- Profundidad de la textura
- Resistencia al deslizamiento

Los parámetros anteriores también varían en forma continua, por lo que, como las roderas o la irregularidad, sólo se modelan mediante ecuaciones de progreso.

El HDM-4 modela cada uno de los deterioros anteriores en forma separada, sin embargo, en última instancia, combina los resultados para obtener un pronóstico de la irregularidad del pavimento.

La aplicación de los modelos de deterioro incluye, también, una estimación de la pérdida de capacidad estructural del pavimento en el tiempo y del deterioro del drenaje.

En la Figura 3.1 se muestran las interacciones entre los modelos utilizados para predecir los tipos de deterioro considerados.

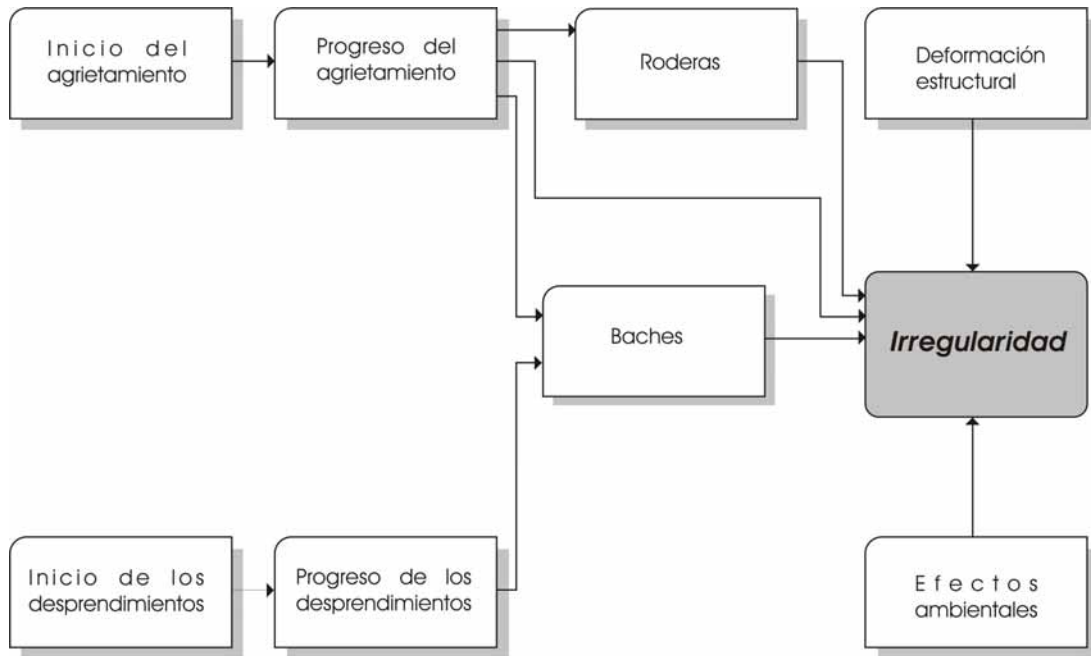


Figura 3.1
Interacción entre los modelos de deterioro del HDM-4 para pavimentos asfálticos

3.4 Descripción general de los modelos

Los modelos que generalmente se utilizan en el análisis del deterioro de pavimentos pueden clasificarse en dos grandes grupos: *mecanicistas* y *empíricos*. Los primeros, tienen fundamento en teorías del comportamiento de pavimentos con una validez ampliamente reconocida; sin embargo, estos modelos requieren de una gran cantidad de datos de entrada, entre los cuales se encuentran parámetros difíciles de obtener en campo. Los modelos empíricos se basan normalmente en un análisis estadístico del deterioro observado en tramos específicos y, por lo tanto, podrían no ser aplicables en condiciones distintas a las prevalentes durante las observaciones.

Con el propósito de minimizar los problemas anteriores, en el desarrollo de los modelos de deterioro del HDM-III se adoptó un enfoque *empírico estructurado*, el cual consistió en identificar la forma funcional y las principales variables a partir de fuentes externas, y en evaluar sus impactos utilizando diversas técnicas estadísticas. De esta manera, se logró combinar en las relaciones obtenidas las bases teóricas y experimentales de los modelos mecanicistas con los comportamientos observados en estudios empíricos. Puesto que los modelos de deterioro del HDM-III constituyeron la base para la integración de los modelos

correspondientes en el HDM-4, estos últimos mantuvieron el carácter empírico estructurado de los primeros.

A fin de ampliar el rango de aplicación de los modelos a regiones con condiciones distintas a las de los sitios en los que se desarrollaron los estudios empíricos considerados, se ha incorporado a las distintas relaciones una serie de factores de calibración diseñados para modificar la escala de los resultados.

Desde el punto de vista de la naturaleza de los resultados pronosticados, los modelos de deterioros del HDM-4 se dividen en dos tipos, *absolutos* y *de incrementos*. Los modelos absolutos predicen la magnitud de los deterioros al final de un determinado periodo, en tanto que los modelos de incrementos calculan el cambio en la magnitud con respecto a un valor inicial. En términos generales, los modelos de deterioro para pavimentos asfálticos se clasifican como modelos de incrementos.

3.5 Procedimiento de cálculo

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. En términos generales, la estimación de afectación anual puede expresarse mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Condición}_b = \text{condición}_a + \Delta\text{condición}$$

$$\text{Condición}_{\text{prom}} = 0.5 (\text{condición}_a + \text{condición}_b)$$

donde:

Condición_b : condición al final del año de análisis

Condición_a : condición al inicio del año de análisis

Δcondición : cambio de la condición en el año de análisis

Condición_{prom}: condición promedio en el año de análisis

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. La Figura 3.2 ilustra este procedimiento.

Modelos no considerados en el análisis

En este trabajo, sólo se considera el agrietamiento estructural y no el debido a los cambios de temperatura, ya que el HDM-4 considera que este deterioro surge en

zonas climáticas muy frías, o en climas sumamente áridos, lo cual no se tomó como un clima que fuera típico de los casos propuestos para el análisis, tratando de ser representativos con las condiciones medias del país.

Otro deterioro no considerado en el análisis es el referido a los desprendimientos, ya que la modelación que lleva a cabo el HDM-4 se enfoca a las carpetas colocadas mediante procesos en frío; para los casos de análisis propuestos en un principio, esto no pareció ser un aspecto muy generalizado.

Por último, el modelo de rotura de borde no se utilizó, ya que el HDM-4 considera este deterioro para las secciones transversales que no incluyen acotamientos, y a pesar de ser una sección bastante común en las carreteras nacionales, los casos de análisis previeron vías con acotamientos incluidos.

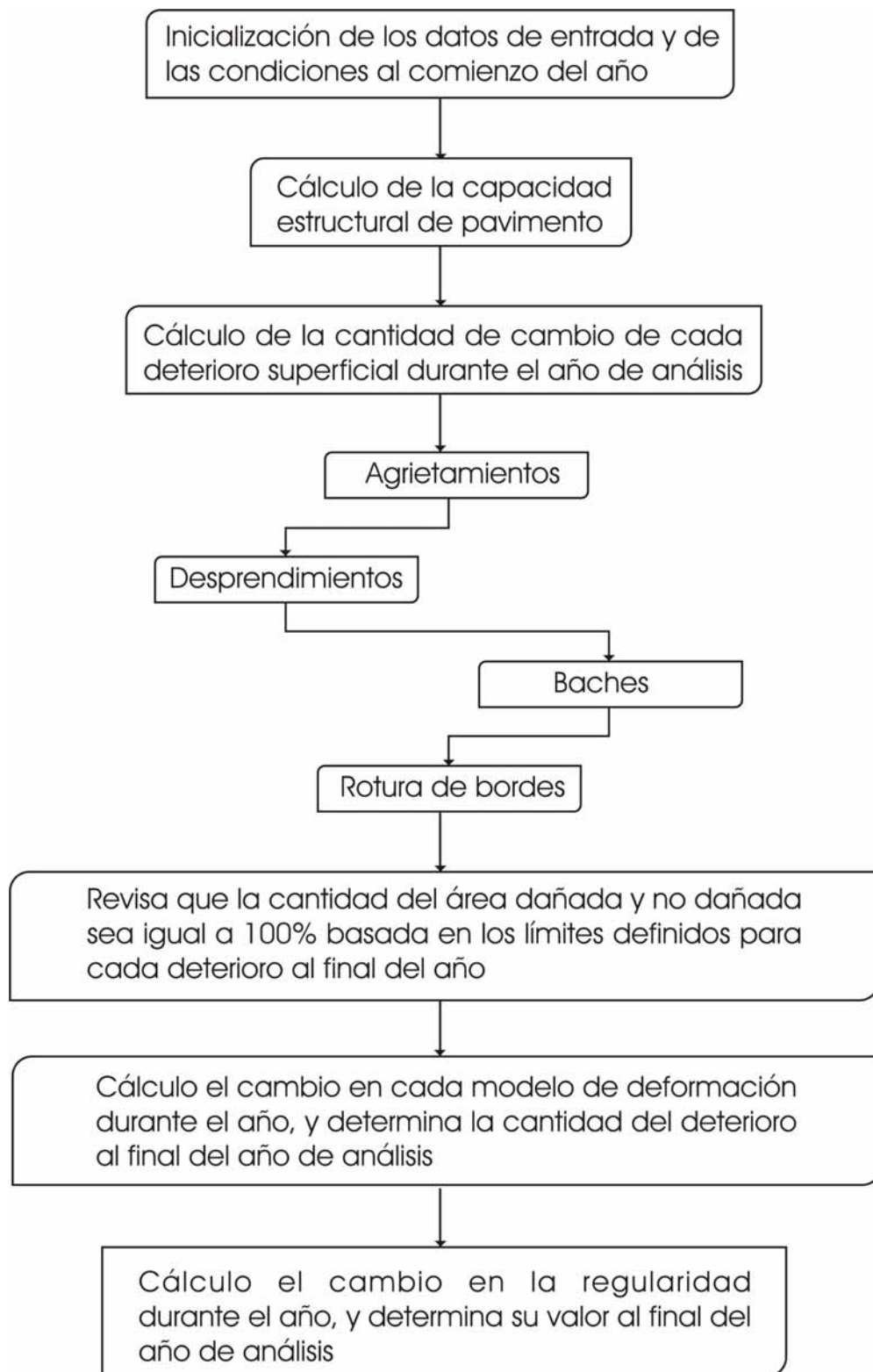


Figura 3.2
Procedimiento para la predicción del deterioro

3.6 Capacidad estructural del pavimento

La resistencia del pavimento se basa en el concepto del número estructural, (SNP), el cual se ha derivado del número estructural modificado.

En el número estructural, cada capa tiene un aporte de resistencia al pavimento; la resistencia disminuye mientras más inferior sea la capa.

El número estructural en el HDM-4 se calcula de la siguiente manera:

$$SNP_s = SNBASU_s + SNSUBA_s + SNSUBG_s$$

$$SNBASU_s = 0.0394 \sum_{i=1}^n a_{is} h_i$$

$$SNSUBA_s = 0.0394 \sum_{j=1}^m a_{js} \left\{ \left(\frac{b_0 e^{(-b_3 z_j)}}{-b_3} + \frac{b_1 e^{-(b_2 + b_3) z_j}}{(b_2 + b_3)} \right) - \left(\frac{b_0 e^{(-b_3 z_{j-1})}}{-b_3} + \frac{b_1 e^{-(b_2 + b_3) z_{j-1}}}{(b_2 + b_3)} \right) \right\}$$

$$SNSUBG_s = [b_0 - b_1 e^{-b_2 z_m}] e^{(-b_3 z_m)} [3.51 \log_{10} CBR_s - 0.85 (\log_{10} CBR_s)^2 - 1.43]$$

donde:

- SNP_s : número estructural ajustado en la estación s^1
- $SNBASU_s$: contribución de la capa superficial y de base para la estación s
- $SNSUBA_s$: contribución de la sub-base, o de distintas capas de relleno seleccionadas para la estación s
- $SNSUBG_s$: contribución del terreno natural para la estación s
- N : número de capas de base y superficiales ($i = 1, 2, \dots, n$)
- a_{is} : coeficientes de capa i de base o superficial para la estación s
- h_i : espesor de la capa i de base o superficial (mm)
- m : número de capas de sub-base y de relleno seleccionadas ($j = 1, 2, \dots, n$)
- z profundidad medida en la parte más alta de la subbase (mm)

¹ El sistema considera dos estaciones: seca y húmeda

| | |
|----------------------|--|
| z_j | profundidad a la parte más baja de la capa j ($z_0=0$) |
| CBR_s | VRS del terreno natural <i>in situ</i> para la estación s |
| a_{js} | coeficiente de capa para subbase, o seleccionada de relleno en la estación s |
| b_0, b_1, b_2, b_3 | coeficientes del modelo |

Efectos estacionales y de drenaje

A fin de considerar las variaciones en la resistencia del pavimento provocadas por cambios estacionales, el HDM-4 toma en cuenta en los modelos de deterioro tanto factores climáticos como el estado del drenaje. Como parámetro representativo de la capacidad estructural del pavimento se utiliza la resistencia anual promedio, la cual se estima a partir de los valores correspondientes a las estaciones seca y húmeda, como se indica a continuación:

$$SNP = f_s SNP_d$$

$$f_s = \frac{f}{\left[(1-d) + d(f^p) \right]^{\frac{1}{p}}}$$

donde:

SNP : número estructural ajustado promedio anual

SNP_d : número estructural en la estación seca

f : relación entre el número estructural de la estación húmeda y la seca

d : duración de la estación seca como parte del año

p : exponente del número estructural (depende del modelo que se utilice: inicio del agrietamiento, deformación estructural, etc)

Cuando se conoce únicamente el valor del número estructural de una estación, el HDM-4 utiliza la siguiente ecuación para calcular la relación entre el SNP de la estación seca y la de la estación húmeda; esta expresión se aplica para cada año del periodo de análisis, tomando en cuenta factores como precipitación, estado del drenaje y agrietamiento:

$$f = K_f \left\{ 1 - \frac{\left[1 - e^{a_0 MMP} \right]}{a_1} \right\} (1 + a_2 DF_a) (1 + a_3 ACRA_a + a_4 APOT_a)$$

donde:

- f : relación entre el número estructural de la estación húmeda y la seca
- MMP : precipitación media mensual
- DF_a factor del drenaje al inicio del año
- $ACRA_a$: area total de agrietamiento al inicio del año de análisis
- K_f : factor de calibración
- a_1, a_2, a_3, a_4 : coeficientes

El factor de drenaje, DF , representa la condición del drenaje; dentro del software, este factor se introduce mediante valores cualitativos (excelente, bueno, regular, etc.), en función de los cuales se selecciona un valor apropiado para DF .

Este factor también depende del tipo de dren más común en el tramo analizado.

La capacidad estructural del pavimento también puede definirse en el programa a través de valores de deflexión medidos con Viga Benkelman o con deflectómetro de impacto.

El HDM-4 utiliza la siguiente expresión para calcular el valor del número estructural a través de la medición de la deflexión.

$$SNP_s = 3.2(DEF_s)^{-0.63} + dSNPK \quad \text{para bases no estabilizadas}$$

$$SNP_s = 2.2(DEF_s)^{-0.63} + dSNPK \quad \text{para bases estabilizadas}$$

donde:

SNP_s número estructural ajustado en la estación s

DEF_s deflexión de la viga Benkelman bajo una carga de 80 kN, con una presión de llanta de 520 kPa, y una temperatura promedio del asfalto de 30°C para la estación s

Cuando se desea usar el valor de la deflexión medida con el deflectómetro de impacto el HDM-4 utiliza la misma ecuación anterior pero con el dato medido en el centro del deflectómetro a 700 kPa. Este valor se considera equivalente a la deflexión medida con viga Benkelman.

3.7 Agrietamiento

Es uno de los deterioros más importantes en los pavimentos asfálticos. La fatiga y el envejecimiento son dos de los principales factores que contribuyen a la generación de este tipo de afectación.

La propagación del agrietamiento puede acelerarse debido al envejecimiento y al ingreso de agua en las grietas ya producidas; lo cual se traduce también en un deterioro de las capas subyacentes.

El análisis del agrietamiento está conformado por dos etapas: la de inicio y la de progreso; además considera dos tipos de agrietamiento, el llamado agrietamiento total, y el agrietamiento ancho. El primero, se refiere a la totalidad del agrietamiento estructural, independientemente de su magnitud. El agrietamiento ancho, sólo considera grietas mayores de 3 mm.

En el caso en que no exista una carpeta colocada previamente y para bases no estabilizadas, el HDM-4 utiliza la siguiente ecuación para calcular el inicio del deterioro.

Inicio del agrietamiento total:

$$ICA = K_{cia} \left\{ CDS^2 a_0 e^{\left[a_1 SNP + a_2 \left(\frac{YE4}{SNP^2} \right) \right]} + CRT \right\}$$

Inicio del agrietamiento ancho:

$$ICW = K_{CIW} \text{MAX}[(a_0 + a_1 ICA), a_2 ICA]$$

donde:

ICA : tiempo en años para el inicio del agrietamiento total

ICW: tiempo en años para el inicio del agrietamiento ancho

CDS: indicador de defectos de la construcción para superficies asfálticas

YE4: número anual de ejes equivalentes

SNP: número estructural promedio

CRT: retardo en la aparición de grietas debido al mantenimiento

Progreso del agrietamiento total:

$$dACA = K_{cpa} \left[\frac{CRP}{CDS} \right] \left[(Z_A a_0 a_1 \delta t_A + SCA^{al})^{1/al} SCA \right]$$

$$\delta t_A = \text{MÁX}\{0, \text{MÍN}[(AGE2 - ICA), 1]\}$$

Progreso del agrietamiento ancho:

$$dACW = K_{cpw} \left[\frac{CRP}{CDS} \right] \left[(Z_W a_0 a_1 \delta t_W + SCA^{al})^{1/al} SCW \right]$$

$$\delta t_W = \text{MÁX}\{0, \text{MÍN}[(AGE2 - ICW), 1]\}$$

donde:

$dACA$: incremento en el área del agrietamiento total durante el año de análisis

$dACW$: incremento en el área del agrietamiento ancho durante el año de análisis

ACA_a :área del agrietamiento total al inicio del año de análisis

ACW_a :área del agrietamiento ancho al inicio del año de análisis

δt_a : fracción del año de análisis, en la cual ocurre el progreso del agrietamiento total

δt_w : fracción del año de análisis, en la cual ocurre el progreso del agrietamiento ancho

$AGE2$: edad del pavimento desde el último resello, sobrecarpeta, reconstrucción o nueva construcción

ICA : tiempo para el inicio del agrietamiento total

ICW : tiempo para el inicio del agrietamiento ancho

CRP : retardo en el progreso del agrietamiento, debido al tratamiento preventivo

3.8 Baches

Un bache se desarrolla por lo regular en una superficie agrietada o con desprendimientos. La presencia de agua acelera su formación y provoca un debilitamiento de la estructura del pavimento.

El HDM-4 expresa los baches en términos de baches unitarios con un volumen de 10ℓ (área circular de 0.1 m² y profundidad de 10 cm).

Inicio de baches:

$$IPT = K_{pi} a_0 \left[\frac{(1 + a_1 HS)}{(1 + a_2 CDB)(1 + a_3 YAX)(1 + a_4 MMP)} \right]$$

donde:

IPT: tiempo entre el inicio del agrietamiento ancho o los desprendimientos y la aparición de baches, en años

HS : espesor total de las capas asfálticas

CDB: indicador de defectos de la base

YAX: número anual de ejes de todos los vehículos motorizados

MMP: precipitación media mensual

K_{pi}: factor de calibración del modelo inicio de baches

El HDM-4 calcula por separado los tiempos de aparición de los baches por agrietamientos y por desprendimientos.

Progreso de los baches:

En el análisis del progreso de los baches, el HDM obtiene también por separado las cantidades que corresponden a los distintos precursores de este fenómeno, en este caso agrietamiento, desprendimientos y ensanchamiento de los baches existentes. El progreso de los baches puede aminorarse mediante la ejecución oportuna de acciones de conservación, por lo que este factor se toma en cuenta con el parámetro TLF.

El HDM utiliza las siguientes expresiones para la estimación del progreso de baches:

$$dNPT_i = K_{pp} a_0 ADIS_i (TLF) \left[\frac{(1 + a_1 CDB)(1 + a_2 YAX)(1 + a_3 MMP)}{(1 + a_4 HS)} \right]$$

$$dNPT = \sum_{i=1}^3 dNPT_i$$

donde:

| | |
|-----------------------------|---|
| $dNPT_i$: | incremento en el número de baches por kilómetro, derivados del deterioro tipo i (agrietamiento ancho, desprendimientos, ensanchamientos) durante el año de análisis |
| $ADIS_i$: | porcentaje de área con agrietamiento ancho o desprendimientos, o número de baches al inicio del año de análisis |
| TLF : | factor tiempo, debido al mantenimiento de baches |
| $dNPT$: | número total de baches generados en el año de análisis |
| K_{pp} : | factor de calibración del modelo de progreso de baches |
| a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 : | coeficientes que dependen del tipo de pavimento y del origen de los baches |

3.9 Área dañada y no dañada

En los modelos de deterioro del pavimento, es importante asegurar que los porcentajes de área dañada y no dañada sumen el 100% de la superficie de rodamiento en cualquier año de análisis.

Para propósitos del modelo, los cuatro tipos de deterioro superficial (agrietamiento, desprendimiento, baches y rotura de bordes), se convierten en áreas de superficie equivalente, y se asume que son mutuamente excluyentes, por lo que la suma de los porcentajes de área afectados por los cuatro deterioros con el de área no dañada, debe ser igual a 100%.

Conforme avanza el deterioro de un pavimento, el agrietamiento y los desprendimientos pueden convertirse en baches y los desprendimientos pueden dar lugar a agrietamiento. Para tomar en cuenta estos fenómenos y para garantizar que los porcentajes de área dañada y no dañada sumen 100%, el HDM-4 reclasifica los tipos de daño en función de su evolución, de manera que, por ejemplo, parte del agrietamiento ancho puede convertirse en baches.

Esta redistribución se basa en las siguientes premisas:

- El agrietamiento se desarrolla, en primera instancia, en una área no dañada pero si ésta no existe, del área de desprendimientos si es mayor que cero. Las zonas agrietadas pueden desarrollar baches, pero no desprendimientos.

- Los desprendimientos pueden aparecer a partir del área no dañada. Una zona con desprendimientos también puede agrietarse, lo que no significa que el desprendimiento desaparezca físicamente.
- Los baches pueden resultar únicamente de áreas agrietadas, con desprendimientos o no dañadas; y a menos de que sea reparada, el área con baches no se puede convertir en agrietamiento, desprendimiento o área no dañada.
- El porcentaje de área con baches tiene un límite máximo de 10% de la superficie total del pavimento, ya que arriba de este límite la superficie de la carpeta no llega a definirse bien, y la función de rugosidad pierde validez.
- La rotura de borde puede desarrollarse únicamente a partir del área agrietada, con desprendimientos o de área no dañada, y a menos que sea reparada, un área con rotura de borde no se puede convertir en baches, agrietamiento, desprendimientos ni área no dañada.

3.10 Roderas

El deterioro conocido como *roderas*, consiste en la deformación permanente y no recuperable a lo largo del tiempo de las distintas capas del pavimento; la cual se manifiesta como depresiones en las huellas de las llantas de los vehículos.

El HDM-4 estima la profundidad de roderas después de calcular los cuatro tipos de deterioros superficiales y de redistribuir las áreas dañadas.

La profundidad total de roderas se basa en la suma de las siguientes componentes:

- Densificación inicial
- Deformación estructural
- Deformación plástica
- Uso de llantas con aditamentos

Densificación inicial:

Este fenómeno se relaciona con el grado de compactación relativa de la base, subbase y capas de relleno (COMP). Dicho parámetro se introduce como parte del segmento carretero; cabe destacar que la densificación inicial sólo se modela para el año que sigue a la construcción de la base de un pavimento; no se toma en cuenta para superficies con más de un año de antigüedad.

Esta componente de la profundidad de roderas se calcula como:

$$RDO = K_{rid} \left[a_0 (YE410^6)^{(a_1+a_2DEF)} SNP^{a_3} COMP^{a_4} \right]$$

donde:

RDO: profundidad de las roderas debidas a la densificación inicial

YE4: número anual de ejes equivalentes (millones/carril)

DEF: deflexión promedio medida con viga Benkelman

SNP: número estructural ajustado del pavimento

COMP: compactación relativa (%)

K_{rid} :factor de calibración para la densificación inicial

Deformación estructural:

Esta componente de las roderas, se modela en el HDM-4 bajo dos condiciones:

Deformación estructural sin agrietamiento:

$$\Delta RDST_{uc} = K_{rst} (a_0 SNP^{a_1} YE4^{a_2} COMP^{a_3})$$

Deformación estructural después del agrietamiento:

$$\Delta RDST_{crk} = K_{rst} (a_0 SNP^{a_1} YE4^{a_2} MMP^{a_3} ACX^{a_4})$$

donde:

$\Delta RDST_{uc}$: incremento de la profundidad de roderas debido a la deformación estructural sin agrietamiento, en el año de análisis

$\Delta RDST_{crk}$: incremento de la profundidad de roderas debido a la deformación estructural cuando ya existe agrietamiento, en el año de análisis

MMP: precipitación media mensual

ACX_a: área del agrietamiento indexado (se refiere a un parámetro que se calcula mediante una ponderación del agrietamiento total y el agrietamiento ancho), al inicio del año de análisis

SNP: número estructural ajustado

YE4: número anual de ejes equivalentes

K_{rst} : factor de calibración para la deformación estructural

Deformación plástica:

Incluye al parámetro CDS, el cual indica si la carpeta es susceptible a este tipo de deterioro. Asimismo, se requiere conocer la velocidad media del tránsito pesado en el tramo en estudio (**Sh**), la cual constituye un parámetro esencial para la estimación de la deformación plástica que a su vez, es uno de los factores más importantes en la generación de las roderas.

A fin de estimar con precisión la deformación plástica se utilizaron los modelos de velocidad descritos en la parte de la documentación relativa a los efectos sobre los usuarios, lo que hizo necesario realizar un análisis a los modelos de velocidad que en un principio no fueron considerados. El incremento anual en la profundidad de roderas debido a la deformación plástica se obtiene como:

$$\Delta RDPD = K_{rpd} CDS^3 a_0 YE4 Sh^{a_1} HS^{a_2}$$

donde:

$\Delta RDPD$: incremento en la deformación plástica durante el año de análisis

CDS : indicador de defectos en la construcción de superficies asfálticas

$YE4$: número anual de ejes equivalentes

Sh : velocidad de los vehículos pesados

HS : espesor total de las superficies asfálticas

K_{rpd} : factor de calibración de la deformación plástica

La componente debida al uso de llantas con aditamentos no se utilizó, ya que solamente aplica para vehículos con clavos en las llantas para facilitar su desplazamiento en superficies cubiertas de nieve, condición poco común en las carreteras mexicanas.

Profundidad total de roderas:

Si la edad de la construcción del pavimento es menor o igual a un año, entonces:

$$\Delta RDM = RDO + \Delta RDPD + \Delta RDW$$

de otra manera:

$$\Delta RDM = \Delta RDST + \Delta RDPD + \Delta RDW$$

donde:

ΔRDM : incremento en la profundidad media de las roderas en ambas huellas, en el año de análisis

RDO : profundidad de roderas debida a la densificación inicial en el año de análisis

$\Delta RDST$: incremento en la profundidad de roderas debida a la deformación estructural en el año de análisis

$\Delta RDPD$: incremento en la profundidad de roderas debida a la deformación plástica en el año de análisis

ΔRDW : incremento en la profundidad de roderas debida a la deformación por el uso de llantas con aditamentos

La profundidad total media de roderas para cualquier año es:

$$RDM_b = \text{MIN}[(RDM_a + \Delta RDM_b), 100]$$

donde:

RDM_b : profundidad media de roderas en ambas huellas al final del año de análisis

RDM_a : profundidad media de roderas en ambas huellas al inicio del año de análisis

Según los estudios que generaron los modelos del HDM-4, (ver capítulo 3), para calcular la rugosidad debida a la profundidad de roderas se correlacionó la desviación estándar de está, como el parámetro usado para la predicción del IRI.

Desviación estándar de la profundidad de roderas

De acuerdo con los estudios tomados en cuenta para el desarrollo de los modelos de deterioro del HDM-4, la irregularidad del pavimento se correlaciona con la desviación estándar de la profundidad de roderas, la cual se calcula con la expresión:

$$RDS_b = \text{MAX}[0.3, (0.9 - 0.04RDM_b)]RDM_b$$

donde:

RDS_b : desviación estándar de la profundidad de roderas al final del año de análisis

RDM_b : profundidad media de roderas al final del año de análisis

Irregularidad (IRI)

El HDM-4 calcula el incremento anual del IRI mediante la integración de cinco componentes: pérdida de capacidad estructural, agrietamiento, deformación permanente o roderas, baches y efectos ambientales.

A continuación se presentan las ecuaciones utilizadas por el sistema para el cálculo de cada componente.

Componente estructural

$$\Delta RI_s = a_0 e^{(mK_{gm} AGE3)} (1 + SNPK_b)^{-5} YE4$$

con

$$SNPK_b = \text{MÁX}[(SNP_a - dSNPK), 1.5]$$

y

$$dSNPK = K_{snpk} a_0 \{ \text{MIN}(a_1, ACX_a) HSNEW + \text{MAX}[\text{MIN}(ACX_a - PACX, a_2), 0] HSOLD \}$$

donde:

ΔRI_s : incremento de la irregularidad debido a la pérdida de capacidad estructural durante el año de análisis

$dSNPK$:reducción en el número estructural debido al agrietamiento

$SNPK_b$: número estructural ajustado, al final del año de análisis

SNP_a : número estructural ajustado, al inicio del año de análisis

ACX_a : área del agrietamiento indexado (asigna diferentes pesos al área de agrietamiento total y al área de agrietamiento ancho), al inicio del año de análisis

$PACX$:área del agrietamiento indexado de la capa superficial anterior

$HSNEW$: espesor de la carpeta más reciente

$HSOLD$: espesor de la carpeta o carpetas anteriores

$AGE3$ edad del pavimento desde la colocación de la última sobrecarpeta

$YE4$: número anual de ejes equivalentes

m : coeficiente del medio ambiente

K_{gm} :factor de calibración para el coeficiente del medio ambiente

K_{snpk} : factor de calibración para SNPK

Componente debida al agrietamiento

El incremento de la irregularidad debido al agrietamiento es:

$$\Delta RI_c = a_0 \Delta ACRA$$

donde:

ΔRI_c : incremento de la irregularidad debido al agrietamiento durante el año de análisis

$\Delta ACRA$: incremento del área total agrietada durante el año de análisis

Componente debida a las roderas

El incremento de la irregularidad provocado por el aumento en la profundidad de roderas es:

$$\Delta RI_r = a_0 \Delta RDS$$

donde:

ΔRI_r : incremento de la irregularidad relacionado con las roderas durante el año de análisis

ΔRDS : incremento de la desviación estándar de la profundidad de roderas durante el año de análisis

Componente debida a baches

El efecto que producen los baches en la rugosidad depende del número de vehículos que realmente los golpean, el cual a su vez depende del volumen del tránsito y de la libertad de maniobra. Esta última se obtiene como:

$$FM = (MAX\{MIN[0.25(CW - 3), 1], 0\}) \left\{ MAX \left[\left(1 - \frac{AADT}{5000} \right), 0 \right] \right\}$$

y

$$\Delta RI_t = a_0 (a_1 - FM) \left[\left(NPT_a TLF + \frac{\Delta NPT TLF}{2} \right)^{a_2} - NPT_a^{a_2} \right]$$

donde:

FM :libertad de maniobra

CW :ancho de calzada

$AADT$: tránsito diario promedio anual

ΔRI_t : Incremento de la irregularidad debido a los baches durante el año de análisis

ΔNPT : incremento en el número de baches por km durante el año de análisis

NPT_a : número de baches por kilómetro al inicio del año de análisis

TLF : factor de tiempo debido al mantenimiento de baches

Componente debida a efectos ambientales

El incremento en el IRI debido a las condiciones ambientales es generado, entre otros factores, por variaciones en la humedad y temperatura de la zona de estudio, y se calcula con la siguiente expresión:

$$\Delta RI_e = m K_{gm} RI_a$$

donde:

ΔRI_e : Incremento de la irregularidad debido a los efectos climáticos durante el año de análisis

RI_a :Irregularidad al inicio del año de análisis

m :Coeficiente ambiental

K_{gm} : Factor de calibración para el componente de efectos ambientales

Incremento total de la rugosidad

El incremento total de la irregularidad del pavimento es:

$$\Delta RI = K_{gp} [\Delta RI_s + \Delta RI_c + \Delta RI_r + \Delta RI_t] + \Delta RI_e$$

La irregularidad al final del año de análisis está dado por:

$$RI_b = MIN[(RI_a + \Delta RI), a_0]$$

El promedio anual del IRI se obtiene como:

$$RI_{av} = 0.5(RI_a + RI_b)$$

donde:

ΔRI : Incremento total de la irregularidad durante el año de análisis

K_{gp} : Factor de calibración para el progreso de la irregularidad

RI_b : Irregularidad del pavimento al final del año de análisis

RI_a : Irregularidad del pavimento al inicio del año de análisis

RI_{av} : Promedio de la irregularidad para el año de análisis

a_0 : Límite máximo de irregularidad permitido por el HDM-4, (por omisión =16)

Profundidad de la macrotextura

La textura del pavimento es quizá la variable más importante que determina la magnitud de las fuerzas laterales y longitudinales que definen la interacción de los vehículos, con el pavimento.

Una superficie tiene dos tipos de textura: microtextura y macrotextura; la primera, determina la máxima resistencia al deslizamiento que proporciona un pavimento seco; mientras que la macrotextura caracteriza la capacidad drenante de la superficie del pavimento.

La macrotextura es relevante para el cálculo de las velocidades del tránsito y, como se ha mencionado, para la estimación de las fuerzas involucradas en la interacción vehículo-pavimento.

El modelo para la predicción de la macrotextura es el siguiente:

$$\Delta TD = K_{id} \left\{ ITD - TD_a - a_0 ITD \log_{10} \left(10^{\left[\frac{ITD - TD_a}{a_0 ITD} \right]} + \Delta NELV \right) \right\}$$

donde

ΔTD : Incremento en el desgaste de la macrotextura durante el año de análisis

ITD: Profundidad de la macrotextura cuando se construyó la superficie

TD_a :Profundidad de la macrotextura al inicio del año de análisis

ΔNELV:Número de pasadas de vehículos ligeros durante el año de análisis (un vehículo pesado equivale a 10 pasadas de un vehículo ligero)

K_{td} : Factor de calibración para la profundidad de la textura

4 Discusión de los resultados

Esta sección se estructuró de la siguiente manera: por una parte, se presenta una discusión de los aspectos relevantes de la aplicación de los modelos mediante la herramienta de cómputo, desarrollada en VBA para Excel. Enseguida se incluye una tabla resumen con los resultados de sensibilidad, en términos de las categorías citadas en el inciso 2.5, junto con un análisis de los resultados que se obtuvieron para algunos parámetros seleccionados por su importancia en el pronóstico del deterioro, o por las singularidades de su comportamiento. Cabe señalar que este análisis no se generalizó para todos los parámetros, en virtud de que existen similitudes en el comportamiento de varios de ellos, y para no extender en demasía el volumen del presente trabajo.

4.1 Observaciones sobre la aplicación de los modelos

Durante el estudio detallado de los modelos, su programación en VBA de Excel y su aplicación para la predicción de deterioros se detectaron diversos aspectos del proceso de cálculo, que se consideró pertinente reproducir en esta parte del trabajo, ya que no se encuentran documentados en los manuales del sistema. A continuación se presentan las observaciones agrupadas de acuerdo con los modelos o parámetros involucrados.

Número estructural

En el software del HDM-4, cuando se elija la opción de especificar la capacidad de carga del pavimento mediante el número estructural, debe tenerse en cuenta que el sistema no considera dentro de este parámetro específico el aporte del terreno natural, el cual calcula por separado con el valor del VRS que el usuario también debe introducir al utilizar esta opción.

De esta manera, si el usuario dispone de un valor de número estructural y desea emplearlo en el HDM-4 debe restar de éste aporte del terreno natural, utilizando las ecuaciones que se incluyen en el inciso 3.5.

Por otra parte, se hace notar que aun cuando el tipo de pavimento se define como AMGB (mezcla asfáltica sobre base granular), el software del sistema admite valores de espesores de la capa de rodamiento previa diferentes de cero, lo cual en rigor, debería corresponder a un pavimento del tipo AMAP (mezcla asfáltica sobre pavimento asfáltico). En cualquier caso, el sistema utiliza en el cálculo del número estructural, el espesor de todas las capas asfálticas definidas.

Agrietamiento

Los parámetros **ICA** e **ICW** definen el tiempo en años, medido a partir del inicio del periodo de análisis, en el que dan principio respectivamente el agrietamiento total y el agrietamiento ancho. Aunque podría suponerse que estos parámetros sólo se calculan una vez, (al inicio del periodo) se pudo comprobar que el HDM-4 obtiene ambos en forma iterativa, actualizando su valor con los resultados anuales de las variables que intervienen en su cálculo.

Resulta interesante también, que el único parámetro utilizado por el modelo de progreso del agrietamiento es el valor de este deterioro en el año inmediato anterior, y que no toma en cuenta parámetros con los que podría suponerse correlaciones, como el número de ejes equivalentes o la precipitación.

Por otro lado, se recomienda prestar especial atención al valor inicial del porcentaje de área con agrietamiento ancho (ACW_0), el cual queda determinado por los siguientes parámetros de entrada: a) área total agrietada (ACA_0 , en %), la cual se define en la sección de los datos del segmento relativa a la condición del pavimento; b) porcentaje de agrietamiento ancho con respecto al agrietamiento total, que se especifica como parte de los datos de calibración.

La recomendación anterior se basa en las siguientes consideraciones:

1. como se vio en el inciso 3.7, la variable δ_{tw} define la fracción del año de análisis en la cual se presenta el progreso del agrietamiento ancho. Para el año en el que se inicia este deterioro, δ_{tw} tiene generalmente un valor menor que 1, ya que resulta prácticamente imposible que el inicio del agrietamiento ancho coincida con el inicio del año. En los años subsiguientes δ_{tw} vale siempre 1, lo cual significa que el deterioro progresa durante todo el año.
2. El HDM-4 define la siguiente condición para el inicio del agrietamiento ancho, la cual se expresa en términos de δ_{tw} , ACA_a (porcentaje de área de agrietamiento total al inicio de cada año) y ACW_a (porcentaje de área de agrietamiento ancho al inicio de cada año):

$$\delta_{tw} > 0, ACA_a > 5\% \text{ y } ACW_a > 0.5\%$$

3. Luego de realizar diversas pruebas con los modelos de agrietamiento ancho, pudo verificarse que la predicción de este deterioro muestra tres comportamientos bien diferenciados, los cuales corresponden a las siguientes condiciones:
 - a) Se cumple la condición de inicio establecida originalmente por el HDM-4

- b) $\delta_{tw} > 0$, pero $ACA_a \leq 5\%$ ó $ACW_a \leq 0.5\%$. En este caso, el programa hace $\delta_{tw} = 0$, y del inicio del agrietamiento se difiere hasta que se cumpla lo establecido por la condición original.
- c) La condición original se cumple en el primer año del periodo de análisis.

De acuerdo con las pruebas realizadas, cuando se cumple la condición c, el deterioro del pavimento debido al agrietamiento ancho es notablemente más acelerado que en los casos definidos por las condiciones a y b. Lo anterior se cumple incluso con valores de ACW_a cercanos al umbral de 0.5%, de manera que, por ejemplo, un valor de ACW_a de 0.51% produce una evolución del deterioro mucho más rápida que uno de 0.49%. Dicho en otras palabras, el parámetro ACW_a tiene un gran impacto sobre los resultados en la vecindad de $ACW_a = 0.5\%$. Se hace notar nuevamente que el valor de ACW_a que corresponde al inicio del periodo de análisis (ACW_0), se integra con los siguientes parámetros introducidos por el usuario: porcentaje de agrietamiento total al inicio del periodo de análisis (ACW_0) y porcentaje de agrietamiento ancho con respecto al agrietamiento total al inicio del periodo de análisis.

4. El agrietamiento ancho juega un papel fundamental como precursor de baches y, con ello, condiciona en forma importante la degradación global del pavimento.

Baches

Dentro del sistema, el crecimiento del área de baches está restringido a un máximo de 10%. Aunque el HDM-4 respeta ese límite para la aplicación del proceso de redistribución del área dañada, en los informes del programa de cómputo se incluyen los valores calculados por el programa antes de tomar en cuenta el límite.

Rodera

La obtención de la profundidad de roderas requiere el valor de la velocidad media de los vehículos pesados, al principio de cada año. Si en el primer año de periodo de análisis aún no se han realizado cálculos de velocidad, el sistema utiliza el valor de la velocidad deseada (VDES2) del transporte más pesado de la flota.

Por otro lado, se observó que el software del sistema falla en condiciones extremas que originan valores de la profundidad de roderas exageradamente altos (del orden de 100 mm). Cabe destacar que no se obtuvieron errores al analizar estos casos con la herramienta programada en Excel, por lo que se presume que el software del sistema podría tener deficiencias relacionadas con el tipo de datos utilizado para almacenar los parámetros involucrados en el modelado de roderas.

Finalmente, la documentación del sistema establece que la contribución de la profundidad de roderas al incremento del IRI, se calcula como:

$$\Delta RI_r = a_0 \Delta RDS$$

donde ΔRDS se refiere al desarrollo de la desviación estándar de la profundidad de roderas durante el año de análisis, y se calcula como:

$$\Delta RDS = RDS_b - RDS_a$$

Sin embargo, al emplear la ecuación anterior en la herramienta programada en VBA, consistentemente se obtuvieron valores distintos a los estimados con el HDM-4. Este problema se resolvió calculando $\square RDS$ como:

$$\Delta RDS = MAX[0.3, (0.9 - 0.04 \Delta RDM)] \Delta RDM$$

Es decir, con una expresión similar a la empleada por el modelo para la desviación estándar de la profundidad de roderas.

Se desconoce cuál es la expresión que realmente debe utilizarse para calcular ΔRDS , pero es claro que lo anterior representa una inconsistencia entre la documentación del sistema y el programa de cómputo.

Profundidad de la macrotextura

Para valores iniciales mayores a 0.67 mm, se observó que la profundidad de la macrotextura sólo disminuye en los primeros años de análisis, para luego tender a ese valor. Con calificaciones iniciales menores no se observó cambio alguno.

Se hace notar que los resultados anteriores no corresponden a la manera en que este deterioro se presenta en la práctica.

Valores máximos de los resultados de referencia

EL HDM-4 limita el crecimiento del IRI a un máximo de 16 m/km y la disminución del número estructural a un mínimo de 1.5. Aunque la herramienta de cálculo desarrollada permite la obtención de valores de estos indicadores más allá de los límites impuestos por el sistema, se decidió respetar éstos para que los resultados de la herramienta fueran equivalentes a los del HDM-4.

Tomando en cuenta lo anterior, las gráficas de sensibilidad se trazaron únicamente con los resultados obtenidos antes de alcanzar los valores límites, ya que al no provenir éstos de la aplicación de los modelos matemáticos, no se consideró válido emplearlos en el cálculo de la sensibilidad.

4.2 Resultados del análisis

Pronóstico del Índice Internacional de Irregularidad (IRI)

En las Tablas 4.1 a 4.4 se presentan los parámetros que participan en el pronóstico del Índice Internacional de Irregularidad (IRI), agrupados según su impacto en este resultado de referencia.

Tabla 4.1
Parámetros del modelo de predicción del IRI con impacto alto

| Categoría de sensibilidad | Elasticidad del impacto | Parámetro | Clasificación |
|---------------------------|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| S-I | > 0.50 | SNP | Características del pavimento |
| | | DEF | Características del pavimento |
| | | HS | Características del pavimento |
| | | AGE2 | Características del pavimento |
| | | HSOLD | Características del pavimento |
| | | ACA | Deterioro inicial del pavimento |
| | | ACW | Deterioro inicial del pavimento |
| | | IRI | Deterioro inicial del pavimento |
| | | PCRA | Deterioro inicial del pavimento |
| | | TDPA | Tránsito |
| | | Porcentaje de vehículos cargados | Tránsito |
| | | Porcentaje de carga | Tránsito |
| | | Indicador de defectos de la carpeta | Calidad de la construcción |
| | | Indicador de defectos de la base | Calidad de la construcción |
| | | Precipitación media mensual | Condiciones climáticas |
| | | Factor m del medio ambiente | Condiciones climáticas |
| | | Zonas climáticas | Condiciones climáticas |
| | | Estación del año (seca o húmeda) | Condiciones climáticas |
| | | Condición del drenaje | Drenaje |
| | | K_{cia} | Calibración agrietamientos |
| | | K_{ciw} | Calibración agrietamientos |
| | | K_{cpw} | Calibración agrietamientos |
| | | K_{pp} | Calibración baches |
| | | K_{qm} | Calibración IRI |
| | | DEF | Número estructural |
| | | ACW 0 | Número estructural |
| | | MMP | Número estructural |
| | | Estación del año (seca o húmeda) | Número estructural |
| | | K_f | Calibración SNP |
| | | CALBFAC | Velocidad |
| | | ENFAC | Velocidad |
| | | Límite de velocidad | Velocidad |

Tabla 4.2
Parámetros del modelo de predicción del IRI con impacto moderado

| Categoría de sensibilidad | Elasticidad del impacto | Parámetro | Clasificación |
|---------------------------|-------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| S - II | 0.20 - 0.50 | NPT | Deterioro Inicial del pavimento |
| | | Tasa de crecimiento del tránsito | Tránsito |
| | | D | Condiciones climáticas |
| | | Tipo de drenaje | Drenaje |
| | | Kcpa | Calibración agrietamientos |
| | | VRS terreno natural | Numero estructural |
| | | Espesor de base hidráulica | Numero estructural |
| | | Espesor de la carpeta asfáltica | Numero estructural |
| | | Coficiente a | Numero estructural |
| | | Tipo de drenaje | Numero estructural |
| | | D | Numero estructural |
| | | IRI inicial | Velocidad |
| | | Número de ascensos-descensos | Velocidad |

Tabla 4.3
Parámetros del modelo de predicción del IRI con impacto bajo

| Categoría de sensibilidad | Elasticidad del impacto | Parámetro | Clasificación |
|---------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| S - III | 0.05 - 0.20 | Grado de curvatura | Características geométricas |
| | | PCRW | Deterioro Inicial del pavimento |
| | | HSOLD | Deterioro Inicial del pavimento |
| | | COMP | Calidad de la construcción |
| | | Kpi | Calibración baches |
| | | Krst | Calibración roderas |
| | | Krpd | Calibración roderas |
| | | Ksnpk | Calibración IRI |
| | | Kgp | Calibración IRI |
| | | VRS subrasante | Número estructural |
| | | VRS sub-base | Número estructural |
| | | VRS base | Número estructural |
| | | Espesor subrasante | Número estructural |
| | | Espesor sub base | Numero estructural |
| | | NPT inicial | Número estructural |
| | | Condición del drenaje | Número estructural |
| | | Kdrain | Calibración SNP |
| | | Kddf | Calibración SNP |
| | | PCTDW | Velocidad |
| | | Grado curvatura | Velocidad |

Cabe hacer notar que se obtuvieron resultados muy similares para los tres casos de análisis estudiados, por lo que los resultados que se presentan pueden considerarse válidos para todos ellos.

En lo que sigue, se destacan algunos aspectos de los resultados para un número limitado de parámetros, los cuales se seleccionaron en función de su importancia para el pronóstico de los resultados de referencia, o por las peculiaridades de su

comportamiento. Los parámetros se agrupan según la categoría de información a la que pertenecen.

Tabla 4.4
Parámetros del modelo de predicción del IRI con impacto muy bajo.

| Categoría de sensibilidad | Elasticidad del impacto | Parámetro | Clasificación |
|---------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| S – IV | < 0.05 | CW | Características geométricas |
| | | Altura s.n.m | Características geométricas |
| | | Num de ascensos-descensos | Características geométricas |
| | | Ascensos y descensos | Características geométricas |
| | | AGE 3 | Características del pavimento |
| | | RDM inicial | Deterioro inicial del pavimento |
| | | TD inicial | Deterioro inicial del pavimento |
| | | PCRW | Deterioro inicial del pavimento |
| | | VDESIR | Tránsito |
| | | Ktd | Calibración de la Textura Superficial |
| | | CW | Velocidad |
| | | Modelos de tráfico | Velocidad |
| | | COV | Velocidad |
| | | TD inicial | Velocidad |
| | | PCTDS | Velocidad |
| | | Ascensos y descensos | Velocidad |
| | | Altura s.n.m. | Velocidad |

Características geométricas

Ancho de calzada (CW):

Se varió en un rango de 5.5 a 9 m, con un valor inicial de 7 m. Este rango corresponde a los límites de ancho de carril para un camino del tipo *carretera de dos carriles estándar*. El tipo de camino es relevante para los modelos velocidad / capacidad.

La gráfica de sensibilidad de este parámetro (Figura 4.1), muestra un ligero cambio de tendencia que se debe a que el modelo aplica un ajuste a la velocidad deseada, para caminos con un ancho de calzada mayor a 6.8 m.

Ascensos y descensos (RF):

En este caso, se utilizó como valor inicial 25 y como rango de variación 0 – 50 (-100% – 100%). Con relación a la Figura 4.2, este parámetro constituye un ejemplo de variables con un comportamiento uniforme y bajo impacto en el IRI. Debe tenerse en cuenta que dicho parámetro tiene una influencia significativa en los modelos de predicción de velocidad.

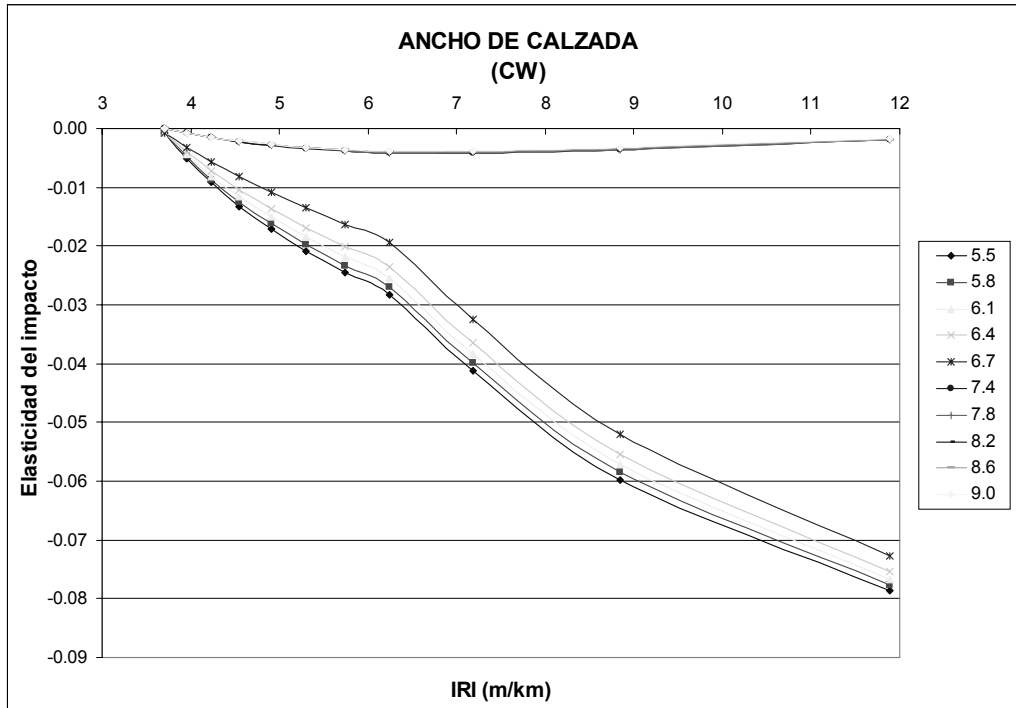


Figura 4.1
Gráfica de sensibilidad del ancho de calzada

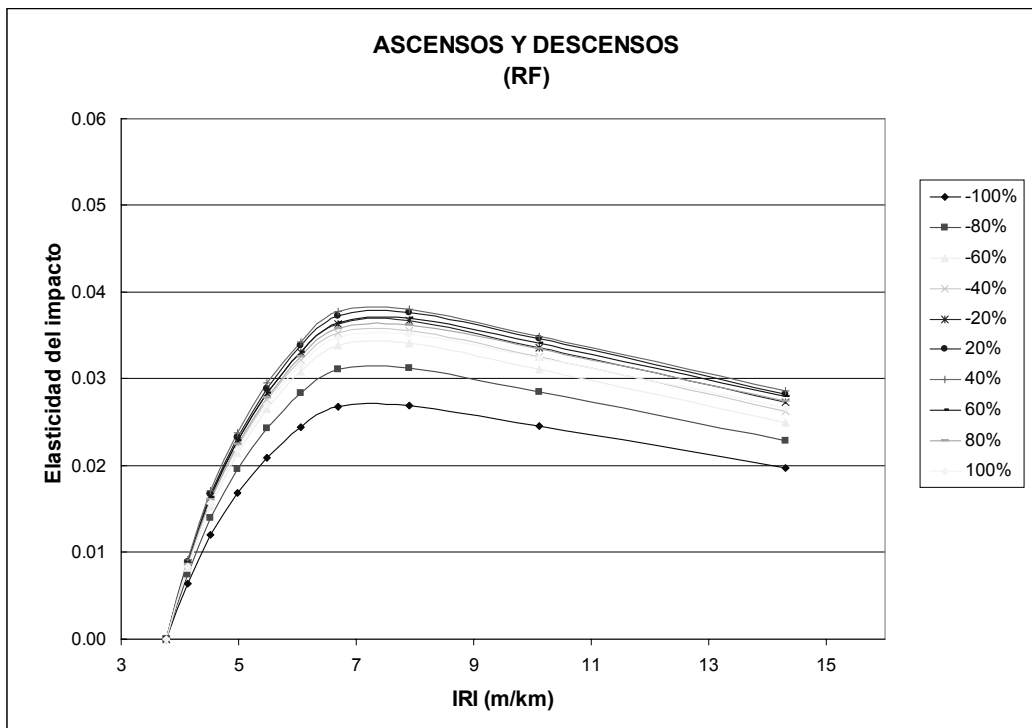


Figura 4.2
Gráfica de sensibilidad de ascensos y descensos

Características del pavimento

Número estructural ajustado (SNP):

Para obtener el valor de referencia de este parámetro se utilizó el método de capas definido por las ecuaciones que se describen en el inciso 3.5, con los datos de la estructura del pavimento correspondientes a cada uno de los casos de análisis. Los valores iniciales se modificaron en un rango de -50 a 50%. El pronóstico del IRI es altamente sensible al SNP, como puede apreciarse en la gráfica de sensibilidad correspondiente (Figura 5.3), en la que todas las curvas cruzan el umbral de alta sensibilidad (0.5). En ésta, como en otras gráficas de sensibilidad que aparecen más adelante, se aprecia un cambio en la tendencia de las curvas que corresponde al momento en que se inicia el agrietamiento ancho.

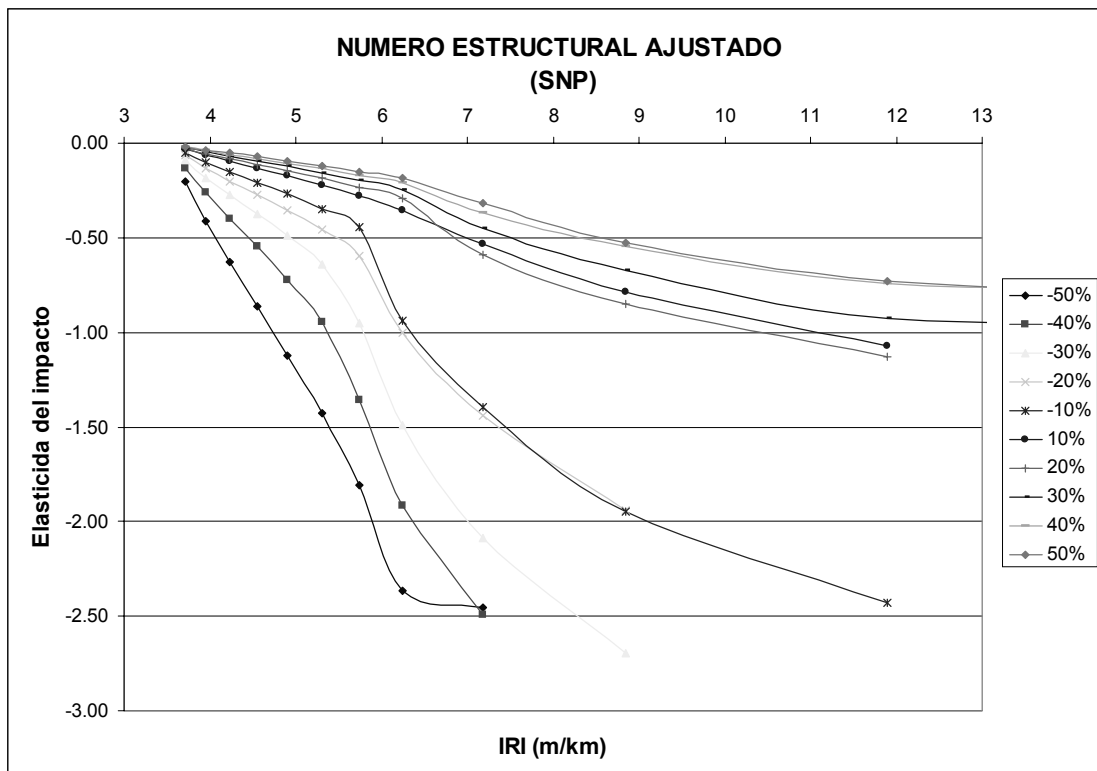


Figura 4.3
Gráfica de sensibilidad del número estructural ajustado

Deflexión (DEF):

Como valor inicial, se tomó el que corresponde al número estructural de referencia para las secciones de análisis. Las deflexiones se modificaron en un rango de -50 a 50%. El comportamiento de este parámetro es similar al de SNP (Figura 4.4), aunque con orientación opuesta por la escala de variación en la que está definido cada parámetro.

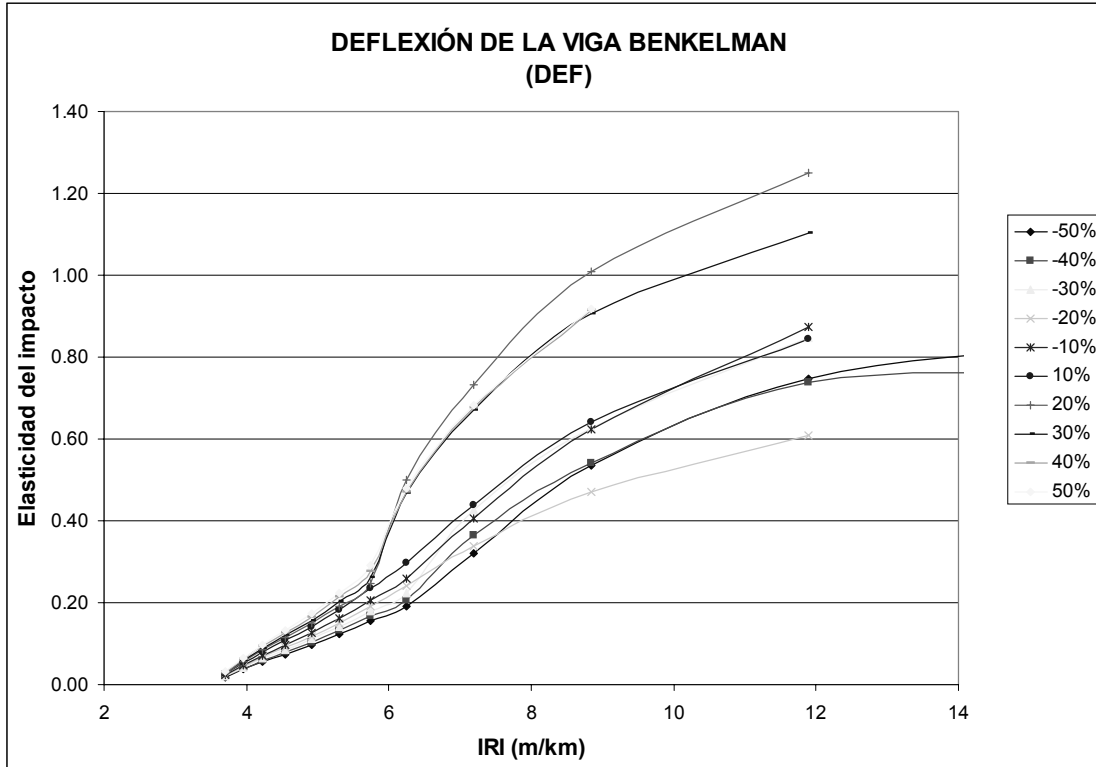


Figura 4.4
Gráfica de sensibilidad de la deflexión

Espesor de la carpeta asfáltica (HS):

El valor inicial equivale a los 70 mm de la sección estructural propuesta, y se utilizó un rango de variación comprendido entre 35 y 105 mm (-50 a 50%) Se trata de otro parámetro de alta sensibilidad, particularmente cuando se subestima el espesor real de la carpeta (Figura 4.5)

Edad del último tratamiento superficial (AGE2):

Este parámetro varió en un rango de 1 a 7 años, con un valor inicial de dos años. Se observó que AGE2 resulta relevante para estimar el agrietamiento cuando éste inicia dentro del periodo de análisis. Sin embargo, conforme crece el parámetro, el agrietamiento tiende a empezar antes del primer año del periodo, con lo cual AGE2 deja de contribuir en la predicción de este tipo de deterioro. De hecho, una vez que la aparición del agrietamiento es anterior del periodo de análisis, se observa una disminución del impacto de AGE2, como puede apreciarse en la gráfica de sensibilidad de la Figura 4.6.

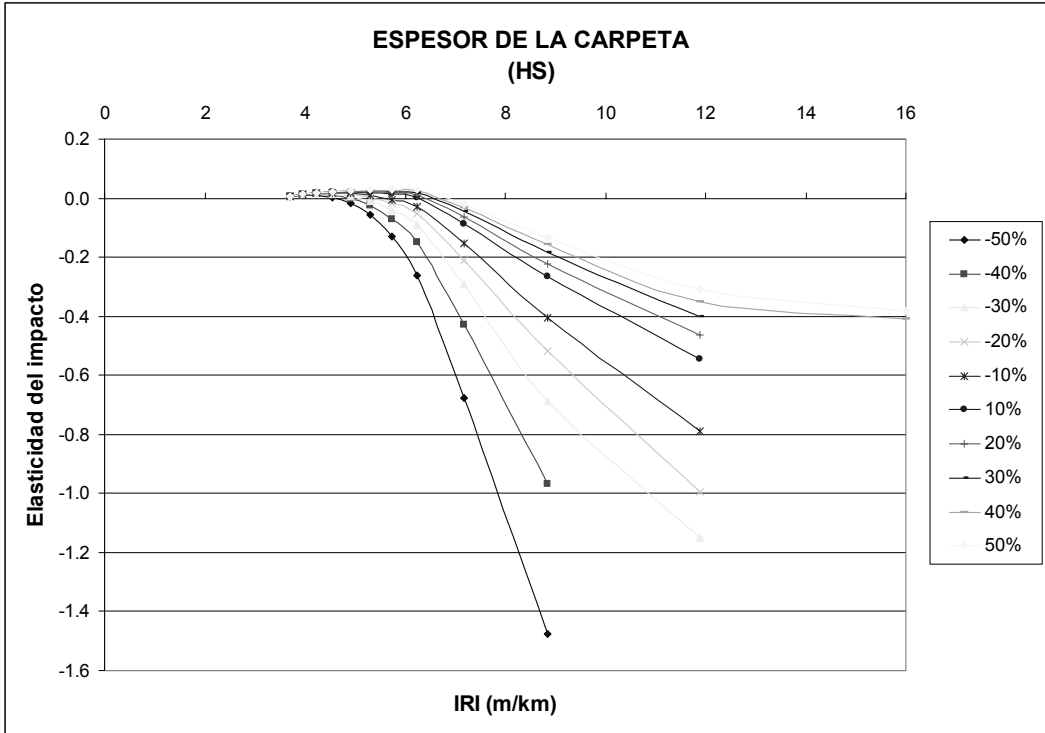


Figura 4.5
Gráfica de sensibilidad del espesor de la carpeta

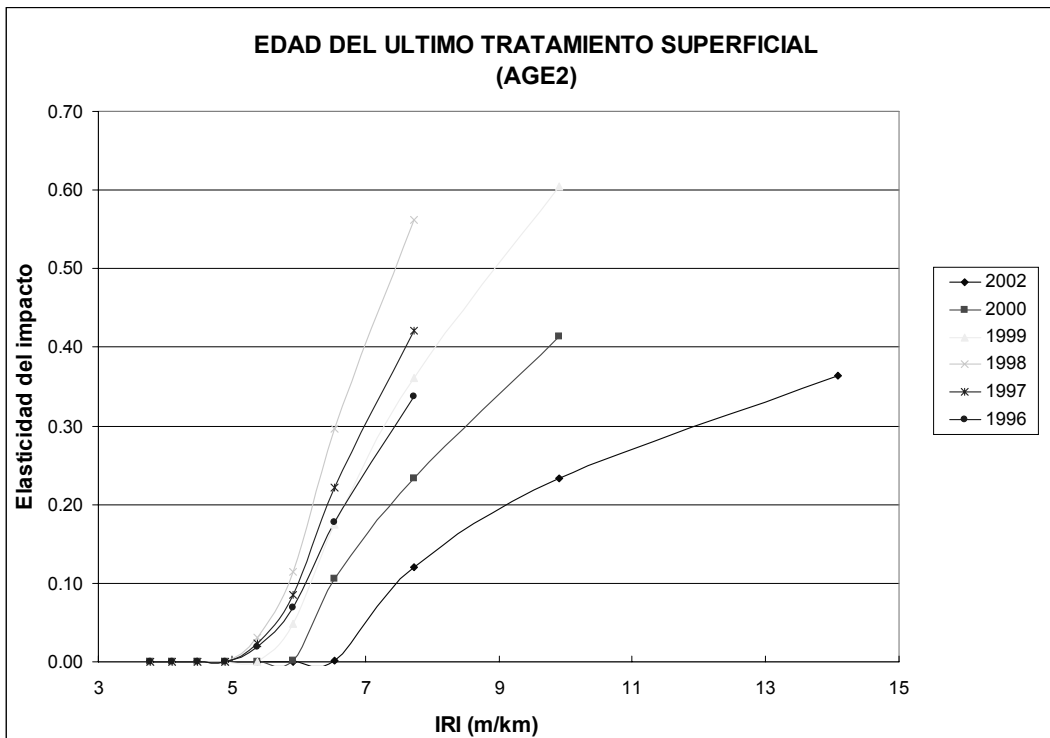


Figura 4.6
Gráfica de sensibilidad de la edad del último tratamiento superficial

Condición inicial del pavimento

Porcentaje de área de agrietamiento total al inicio del periodo (ACA):

Originalmente se propuso para ACA un valor inicial de 5%, y un rango de variación de 2.5 a 7.5%. Para las condiciones anteriores se obtuvo un impacto muy bajo, contrariamente a lo esperado para este parámetro. Por lo anterior, se decidió explorar su comportamiento con valores iniciales más altos, para lo cual fue necesario modificar también el porcentaje de agrietamiento ancho con respecto a ACA (ACW), a fin de mantener la congruencia del análisis. Luego de hacer corridas con una gran variedad de parejas (ACA, ACW), se descubrió que la sensibilidad mostraba tres comportamientos bien diferenciados, que pudieron relacionarse con las tres condiciones que determinan el inicio del agrietamiento ancho (ver la sección referente a agrietamiento en el inciso 4.1).

En la Figura 4.7 se muestra la gráfica de sensibilidad de ACA, para un caso en el que usaron como valores iniciales ACA = 35% y ACW = 10%, y ACA se varió en un rango de -50 a 50%. Los tres comportamientos mencionados están representados por las curvas de la parte inferior, la parte media y por la envolvente superior que aparecen en la gráfica.

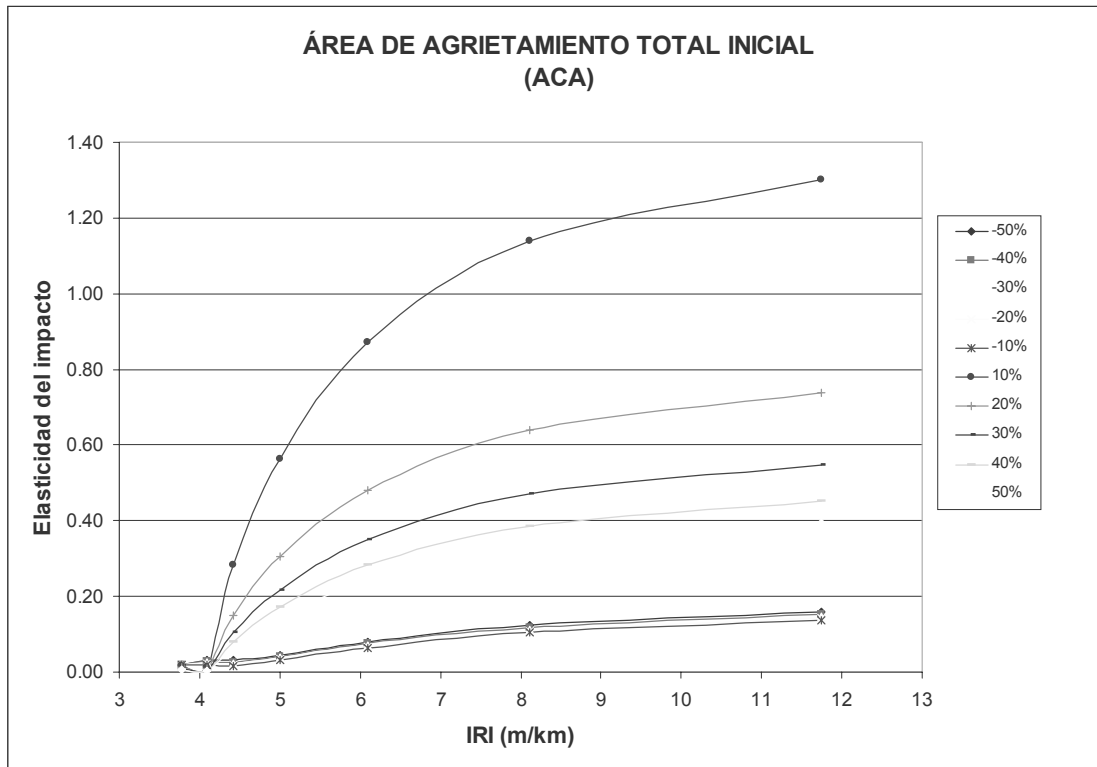


Figura 4.7
Sensibilidad del área de agrietamiento total al inicio del periodo

Número de baches al inicio del periodo (NPT):

Con un valor inicial de 25 baches se probaron dos rangos de variación, de 12.5 a 37.5 baches (-50 - 50%), y de 12.5 a 1 000 baches (-50 - 4000%). El segundo rango se utilizó debido a que la magnitud en términos absolutos del valor inicial era demasiado pequeña para que las variaciones porcentuales se tradujeran en cambios significativos del parámetro. La Figura 4.8 muestra la gráfica de sensibilidad que corresponde al segundo rango de variación.

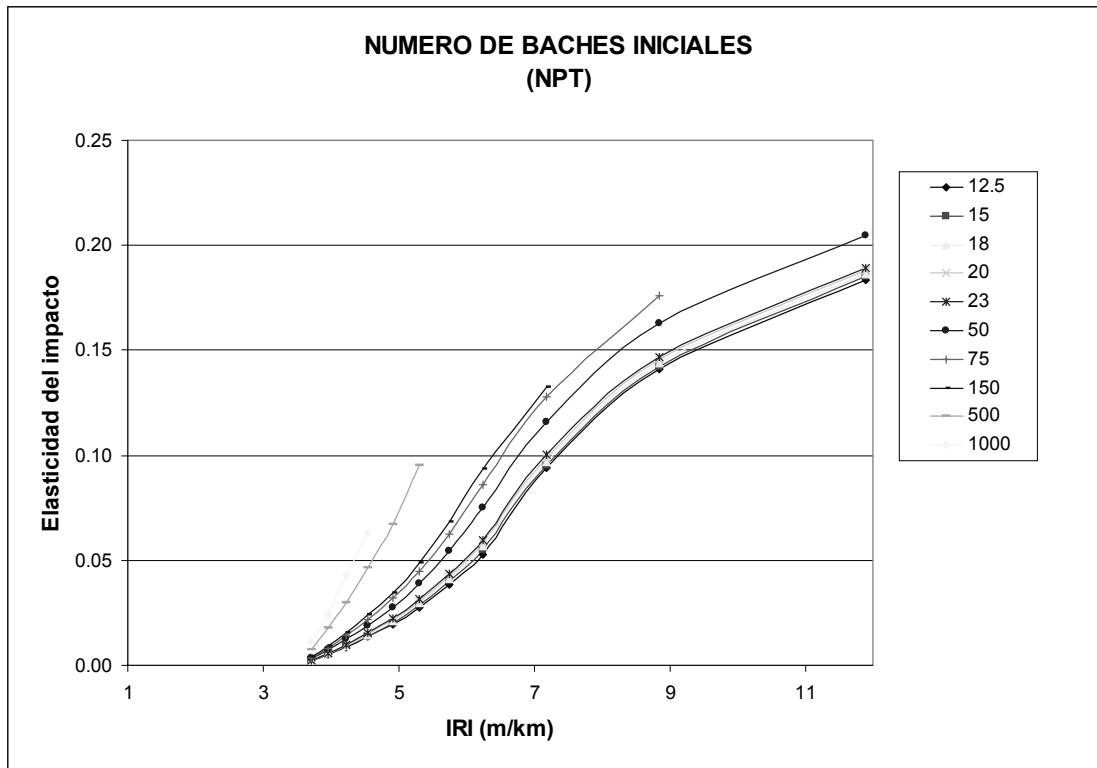


Figura 4.8
Gráfica de sensibilidad del número de baches al inicio del periodo

Profundidad media de roderas al inicio del periodo (RD):

Su sensibilidad se evaluó en un rango de variación de 2.5 a 7.5 mm, con un valor inicial de 5 mm (porcentajes de cambio de -50 a 50%)

En todos los casos se obtuvo una elasticidad de impacto nula, ya que, según pudo comprobarse, este parámetro no participa ni en el pronóstico anual de la profundidad de roderas ni en el del IRI.

Los resultados de sensibilidad respectivos se relacionan con la inconsistencia en el cálculo de la desviación estándar de la profundidad de roderas (ΔRDS) que se menciona en 4.1. Conviene señalar que si se utilizara para el cálculo de ΔRDS la expresión indicada en la documentación del HDM-4, la sensibilidad de la profundidad de roderas no sería cero, lo cual resultaría más congruente con el

comportamiento esperado para ese parámetro. Lo anterior parece ser un indicio de que el software del sistema utiliza una expresión errónea para el cálculo de $\square RDS$.

Irregularidad al Inicio del periodo (RI):

Se utilizó un valor inicial de 3.5 m/km y un rango de variación de 1.75 – 5.25 m/km (-50 - 50%). En este caso, como se observa en la gráfica de sensibilidad correspondiente (Figura 4.9), la elasticidad del impacto no depende del porcentaje de variación utilizado y se nota un comportamiento idéntico entre ellas. A continuación se presenta a manera de demostración que la elasticidad de impacto siempre es la misma, sin importar el porcentaje de variación que se le haga al parámetro inicial.

$$RIb_o = (RIa_o + \Delta RI)$$

$$RIb = (RIa + \Delta RI)$$

$$EI = \frac{(RIa + \Delta RI) - (RIa_o + \Delta RI)}{RIa_o + \Delta RI} \left(\frac{I}{V} \right)$$

$$EI = \frac{RIa - RIa_o}{RIa_o + \Delta RI} \left(\frac{I}{V} \right)$$

donde $RIa = (1 + V)RIa_o$

$$EI = \frac{(1 + V)RIa_o - RIa_o}{RIa_o + \Delta RI} \left(\frac{I}{V} \right)$$

$$EI = \frac{RIa_o(V)}{(RIa_o + \Delta RI)V}$$

$$EI = \frac{RIa_o}{RIa_o + \Delta RI}$$

donde:

- RIb_o IRI al final del año del parámetro sin variar
- RIa_o IRI al inicio del año del parámetro sin variar
- RIa IRI al inicio del año del parámetro variado
- RIb IRI al final del año del parámetro variado

| | |
|--------------|--------------------------------|
| Δ IRI | Incremento en el IRI en el año |
| V | porcentaje de variación |
| EI | Elasticidad del impacto |

Como puede observarse, no importa el valor de la variación que se asigne al parámetro inicial, porque no tiene ninguna influencia en la elasticidad obtenida, por otro lado, se observa que la elasticidad del impacto tiende a cero conforme el pronóstico de IRI crece, lo cual se explica porque el resto de las variables que describen el estado del pavimento no se modifican y la estimación del deterioro del pavimento tiende a ajustarse a lo indicado por esas variables.

De hecho, la máxima sensibilidad teórica para este parámetro es 1, la cual se obtendría en caso de que la contribución del resto de los parámetros descriptivos del estado del pavimento, fuera despreciable.

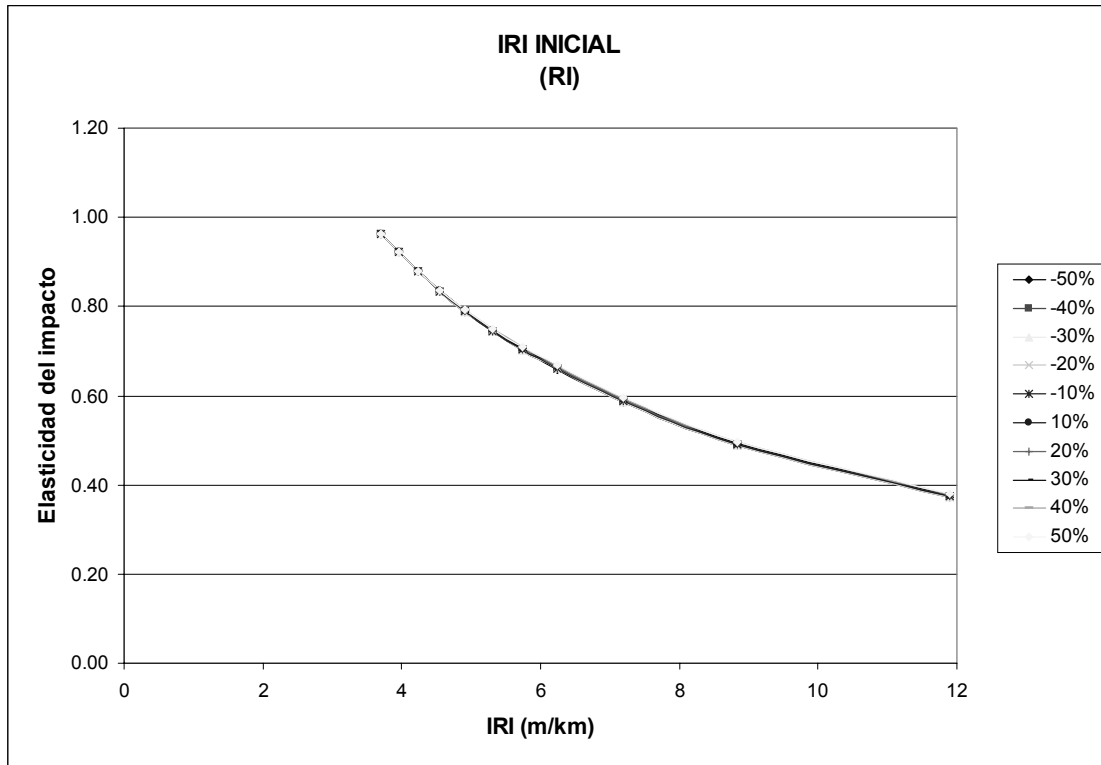


Figura 4.9
Gráfica de sensibilidad del IRI al inicio del periodo

Tránsito

Tránsito diario promedio anual (TDPA):

Es uno de los parámetros que se emplearon en la integración de los casos de análisis. Para las condiciones correspondientes al primer caso de estudio, se definió un valor inicial de 3000 veh/día y un rango de variación de 1500 a 4500

veh/día (-50 - 50%). Además de la alta sensibilidad de este parámetro, se observa un incremento notable en la pendiente de las curvas de elasticidad del impacto (Figura 4.10), el cual pudo asociarse con la aparición de baches generados a partir del agrietamiento ancho.

Porcentaje de carga de los vehículos pesados:

Esta variable no constituye propiamente un parámetro del HDM-4, sin embargo, se consideró interesante evaluar su comportamiento en virtud de su estrecha vinculación con del deterioro de las carreteras. Como valor de referencia se utilizó un porcentaje de 100%, el cual se varió desde 50 hasta 150%. Nótese que las curvas de elasticidad correspondientes (Figura 4.11), también presentan el incremento de la pendiente relacionado con la aparición de baches.

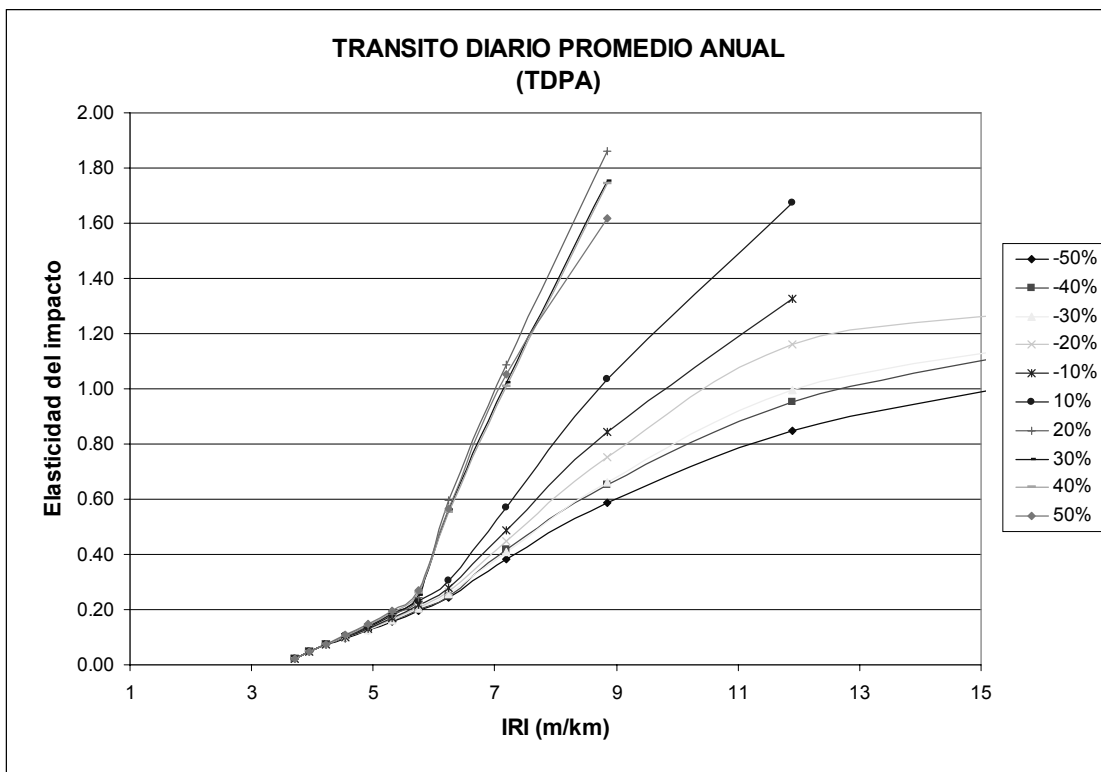


Figura 4.10
Gráfica de sensibilidad del TDPA

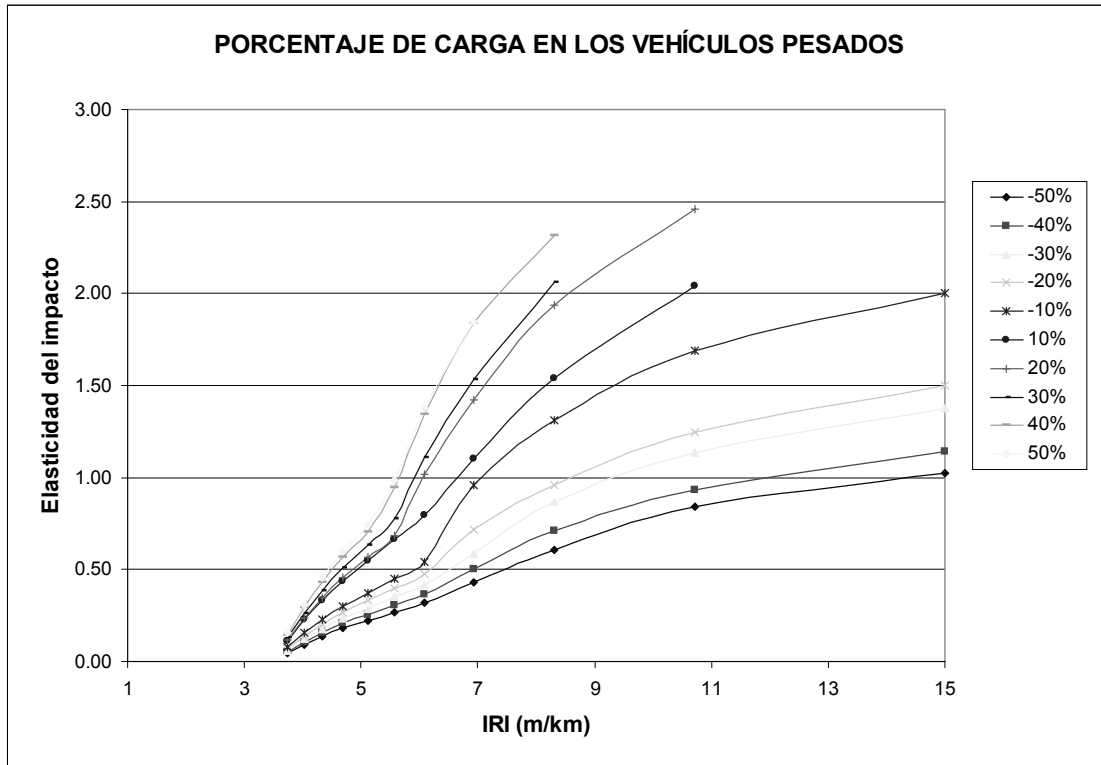


Figura 4.11
Sensibilidad del porcentaje de carga de los vehículos pesados

Tasa de crecimiento del tránsito:

Aunque el HDM-4 permite definir una tasa de crecimiento para cada tipo de vehículo, por razones prácticas se utilizó el mismo porcentaje para toda la flota. Se definió un valor inicial de 3%, el cual se varió entre 1.5 y 4.5% (porcentaje de cambio de -50 a 50%). En la Figura 4.12 se muestra la gráfica de sensibilidad de este parámetro.

Calidad de la construcción

Indicador de defectos de construcción de la base (CDB):

En el conjunto de datos que definen los casos de análisis, se estableció un valor de cero para CDB. Sin embargo, como no es posible calcular la elasticidad del impacto utilizando un valor inicial de cero, se decidió cambiarlo por 0.75. El parámetro se modificó para todo el rango de variación permitido, es decir, de 0 a 1.5, con lo cual el rango de porcentajes de cambio quedó en -100 - 100%. La Figura 4.13 contiene la gráfica de sensibilidad de CDB.

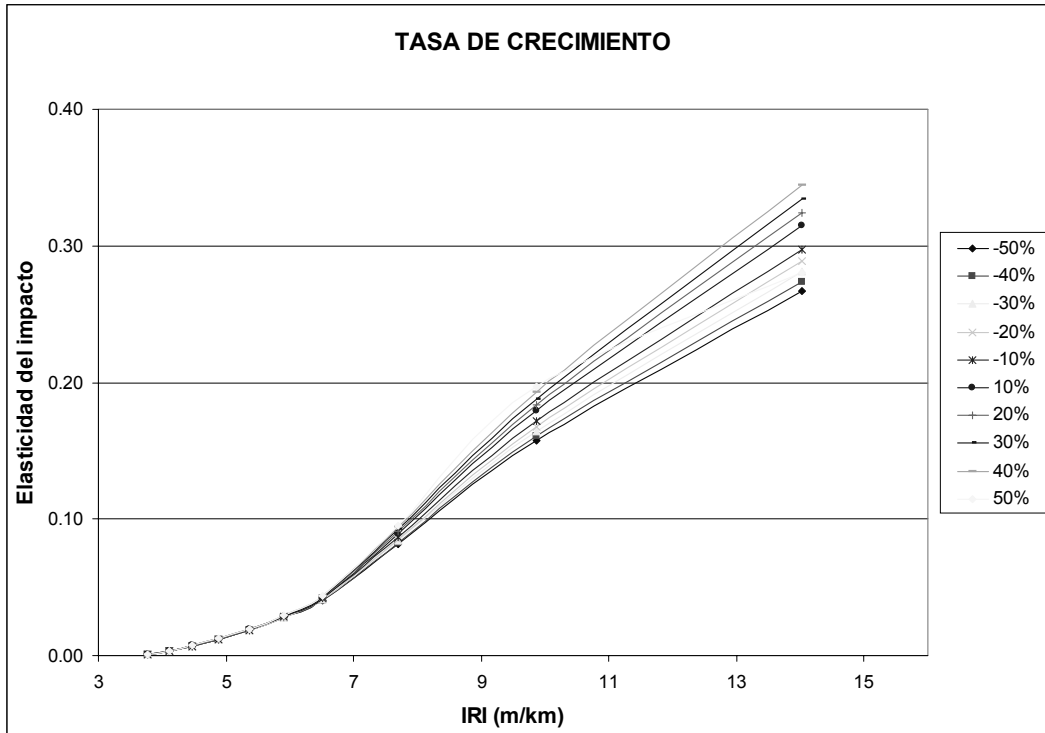


Figura 4.12
Sensibilidad de la tasa de crecimiento del tránsito

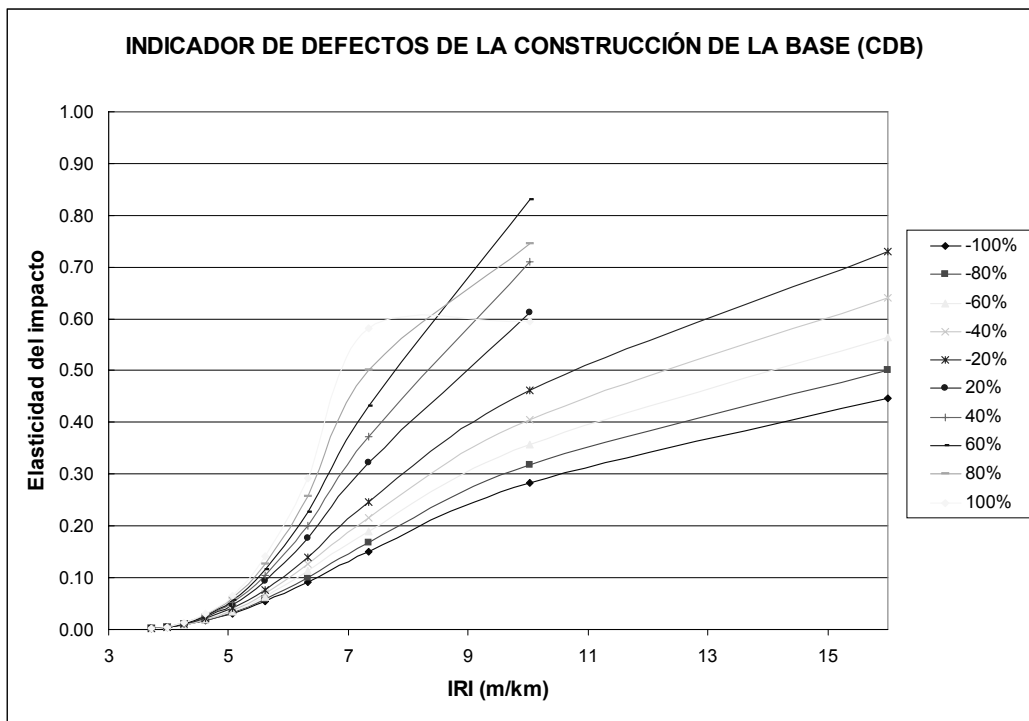


Figura 4.13
Sensibilidad del indicador de defectos de construcción de la base

Compactación relativa (COMP):

En este caso se utilizó un valor inicial de 90%, el cual se varió en el rango admitido por el sistema (80 - 100%). En la Figura 4.14 se muestra la gráfica de sensibilidad correspondiente.

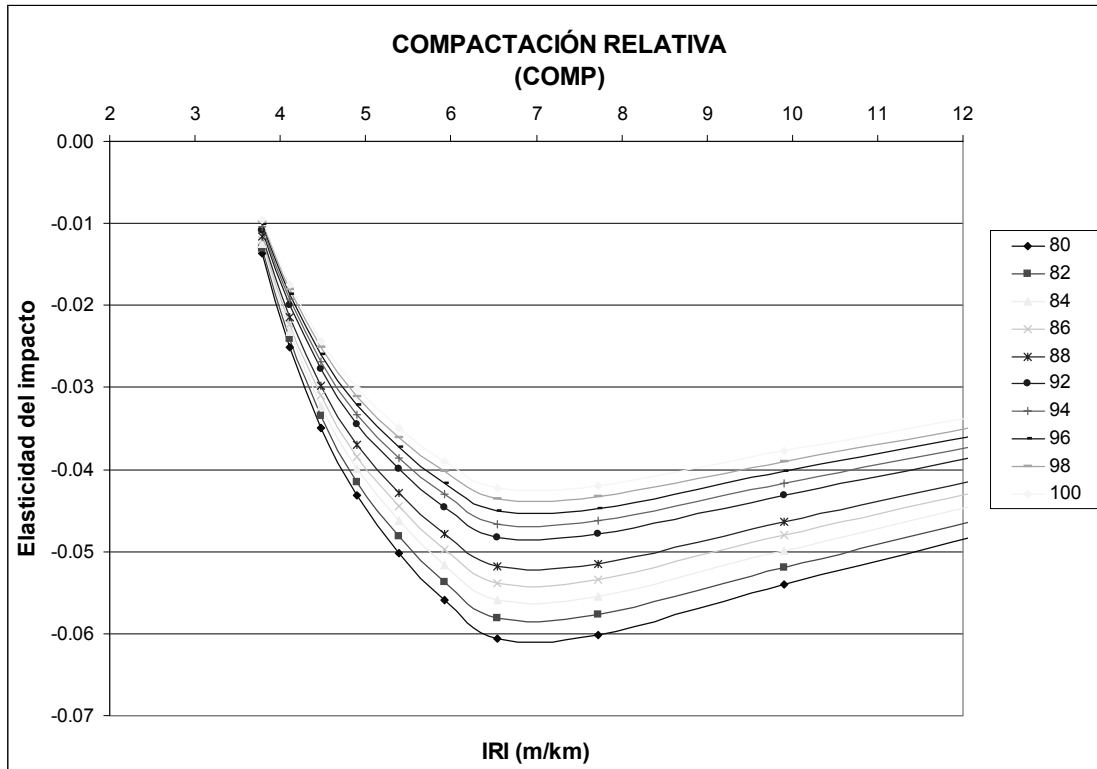


Figura 4.14

Sensibilidad del indicador de defectos de construcción de la base

Condiciones climatológicas

Precipitación media mensual (MMP):

Se empleó un valor inicial de 100 mm; se eligió a partir de las condiciones climatológicas de los casos de análisis. El parámetro se varió entre 50 y 150 mm (-50% y 50%), el cual resultó con un impacto alto, como puede apreciarse en la Figura 5.15.

Factor climático (m):

Para este parámetro se probaron dos condiciones, que corresponden a las categorías de temperatura identificadas como *tropical* y *fría*. En el primer caso, se recurrió a un valor inicial de 0.02, con un rango de variación de 0.005 a 0.03 mm. Para la categoría *fría* se utilizaron 0.06 y (0.025, 0.1). Se obtuvieron impactos de los tipos S-II para la primera categoría, y S-I para la segunda, por lo que el

parámetro quedó finalmente clasificado como S-I. En la Figura 4.16 se presentan los resultados correspondientes a la categoría *fría*.

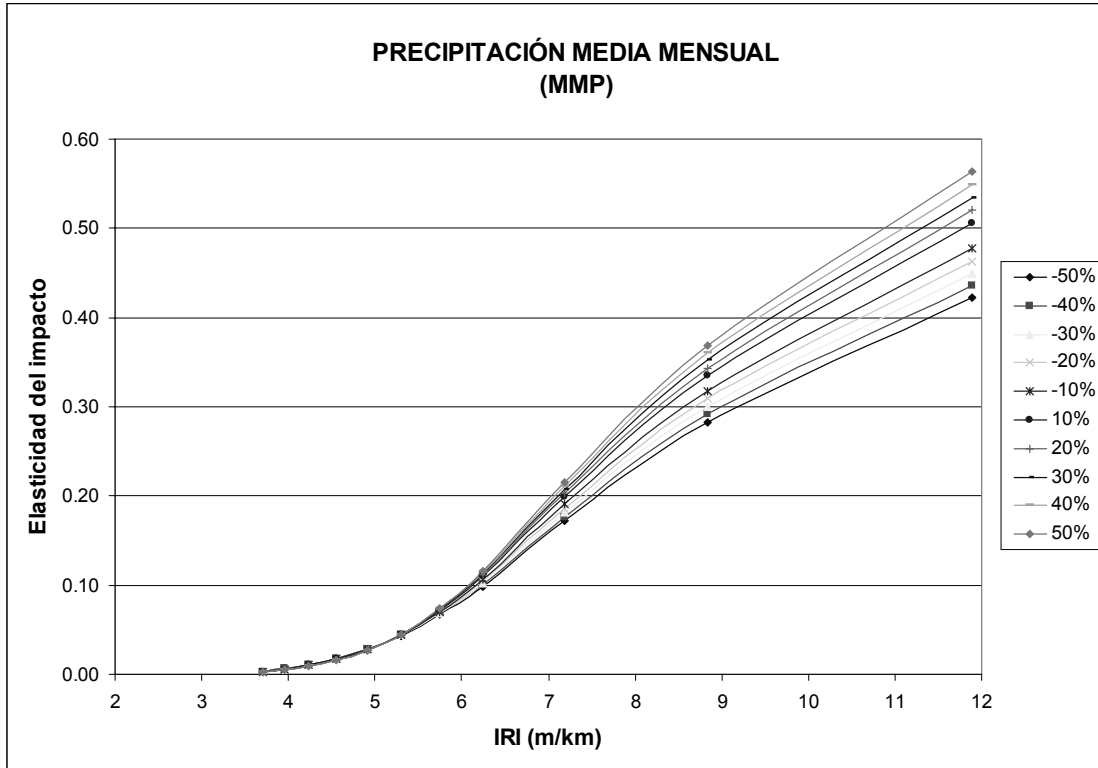


Figura 4.15
Gráfica de sensibilidad de la precipitación media mensual (MMP)

Duración de la estación seca (d)

A partir de un valor inicial de 0.5, se varió entre 0 y 1 (-100 - 100%) Los resultados del análisis de su sensibilidad se muestran en la Figura 4.17.

Pronóstico del número estructural ajustado (SNP)

En la Tabla 4.5 se presenta la clasificación de los parámetros que intervienen en el cálculo del SNP, de acuerdo con su impacto en el pronóstico de este indicador.

Al igual que en el caso del IRI, se incluyen a continuación los resultados para algunos de los parámetros anteriores.

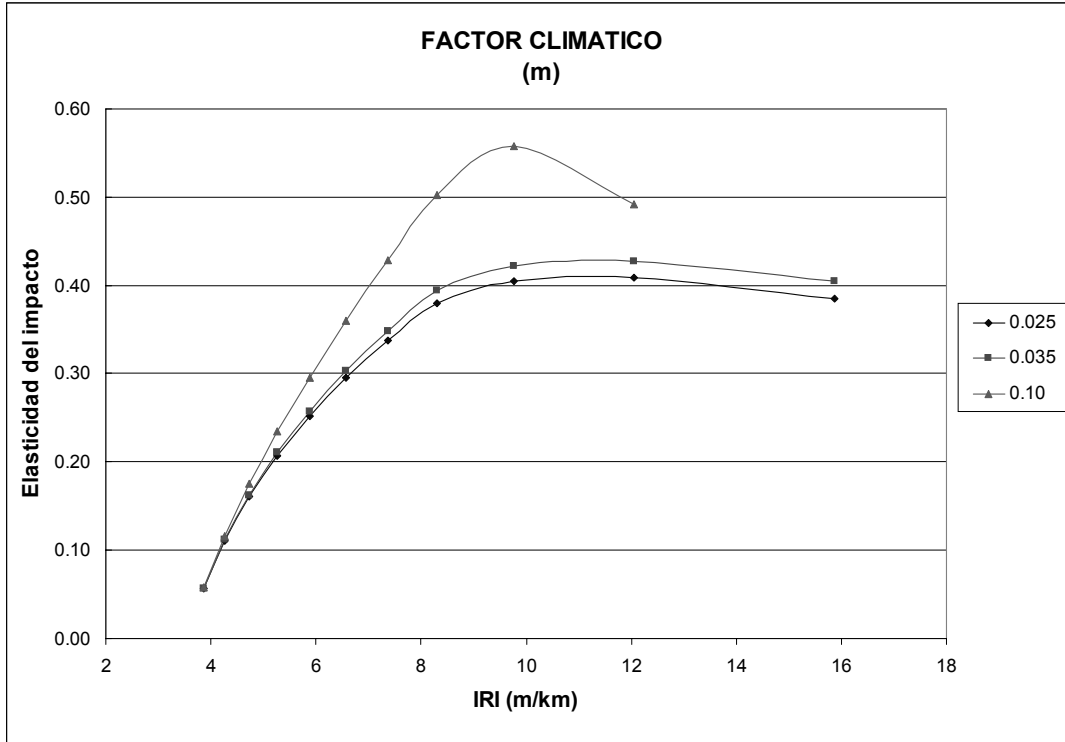


Figura 4.16
Gráfica de sensibilidad del Factor Climático (m)

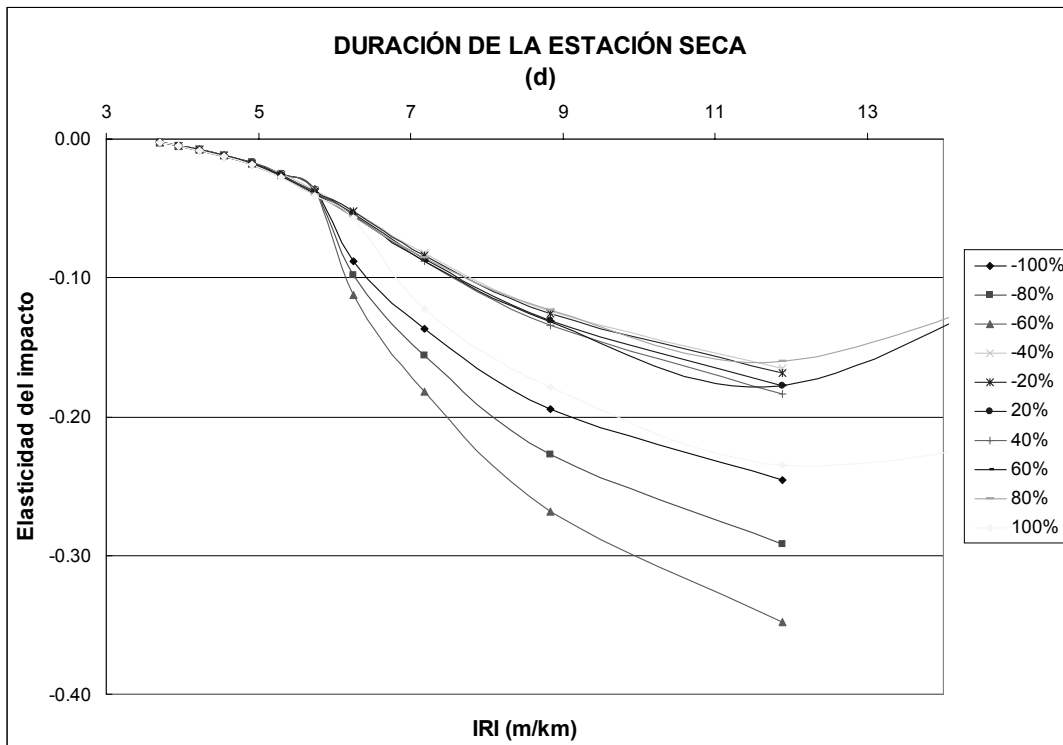


Figura 4.17
Gráfica de sensibilidad de la duración de la estación seca (d)

Tabla 4.5
Clasificación de los parámetros del número estructural
en función de su categoría de sensibilidad

| Categoría de sensibilidad | Elasticidad del impacto | Parámetro |
|---------------------------|-------------------------|------------------------------|
| S-I | > 0.50 | MMP |
| S-II | 0.20 - 0.50 | Espesor de la carpeta |
| | | Coefficiente a de la carpeta |
| | | ACW 0 |
| | | Duración de la estación seca |
| | | VRS terreno natural |
| S-III | 0.05 - 0.20 | Tipo de dren |
| | | VRS sub-rasante |
| | | VRS sub-base |
| | | VRS base |
| | | Espesor de la sub-base |
| | | Espesor de la base |
| | | ACA 0 |
| | | Estado del drenaje |
| S-IV | < 0.05 | Estación húmeda o seca |
| | | Espesor de la sub-rasante |
| | | NPT o |

Precipitación media mensual (MMP):

Como en el caso del IRI, se utilizó un valor inicial de 100 mm, y porcentajes de variación comprendidos entre -50 y 50%. En la Figura 4.18 se muestra la gráfica de sensibilidad correspondiente. Como se aprecia en la Tabla 4.5, éste fue el único parámetro del SNP que quedó clasificado en la categoría de sensibilidad S-I.

Espesor de la carpeta (HS):

Nuevamente, el valor inicial corresponde a los 70 mm de la sección estructural propuesta. Se utilizó también un rango de variación de 35 a 105 mm (-50% a 50%) Los resultados de sensibilidad corresponden a la Figura 4.19.

Duración de la estación seca:

La gráfica de sensibilidad (Figura 4.20) se obtuvo empleando un valor inicial de 0.5, y variación de -50 a 50%, es decir, de 0.25 a 0.75.

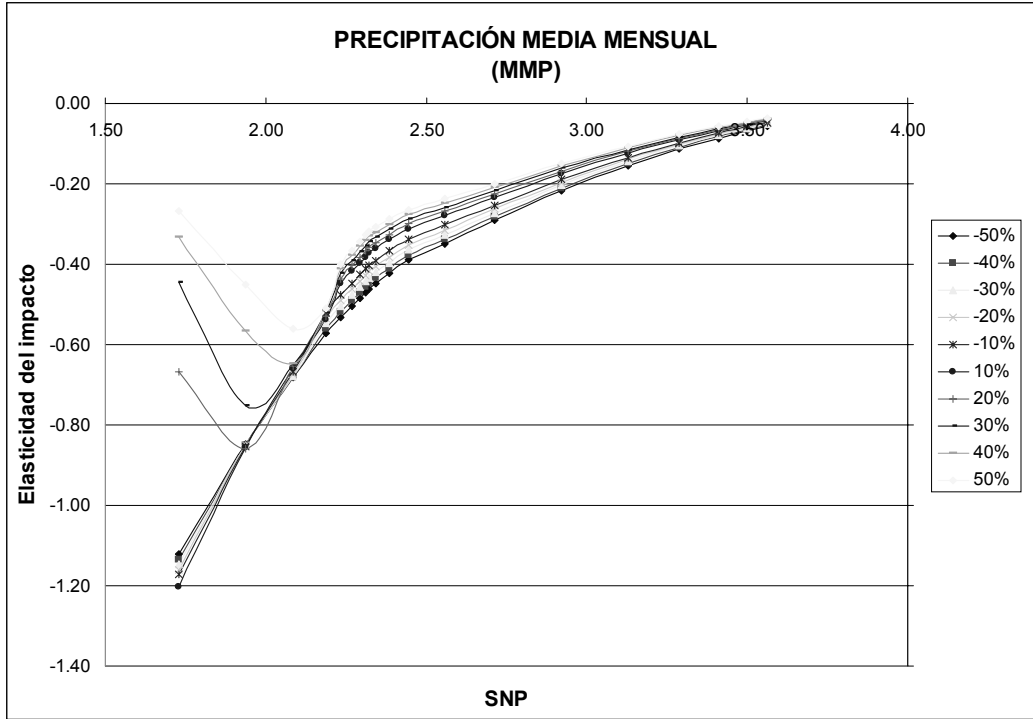


Figura 4.18
Sensibilidad de la precipitación media mensual (MMP) para el número estructural

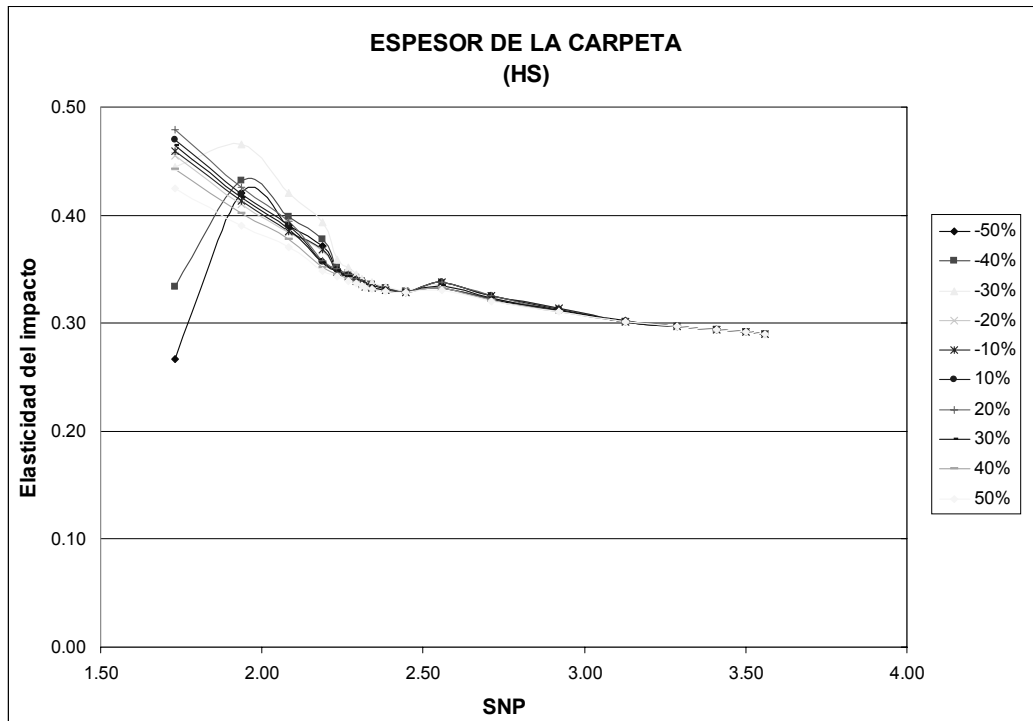


Figura 4.19
Sensibilidad del espesor de la carpeta (HS) para el número estructural

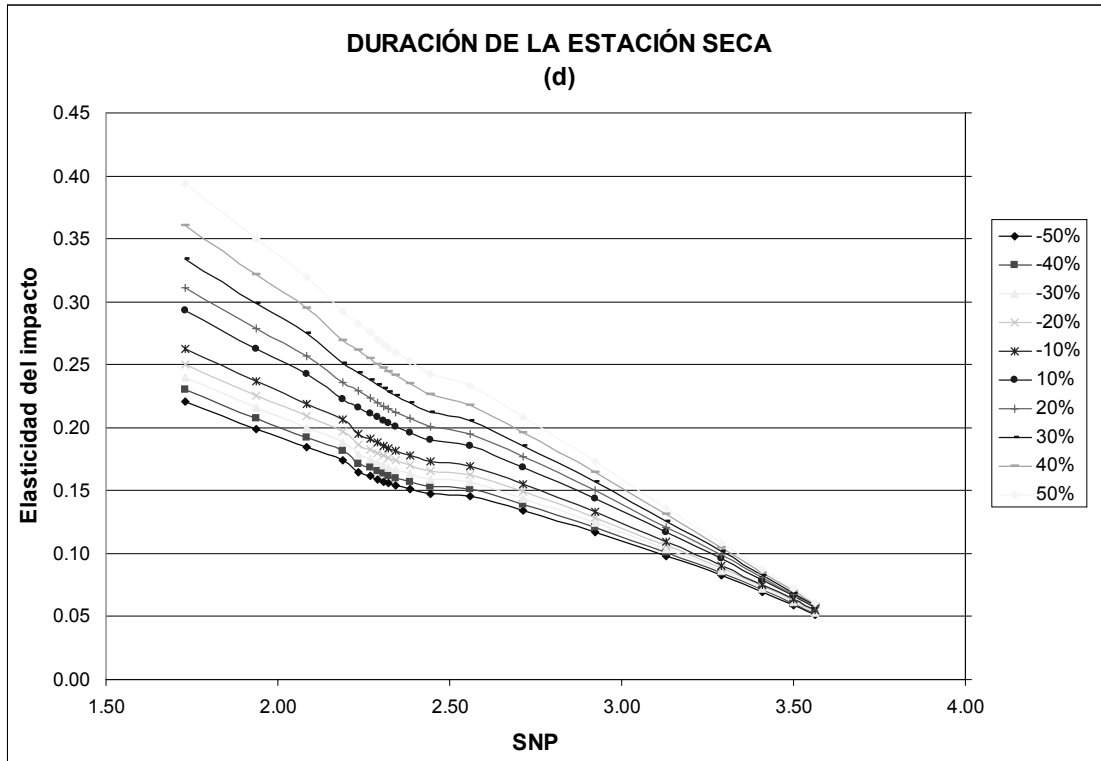


Figura 4.20
Variación de sensibilidad de la duración de la estación seca (d)
para el número estructural

Conclusiones

Del presente trabajo se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. Se comprobó que en la mayoría de los casos, la sensibilidad de los modelos de deterioro depende de los porcentajes de variación de los parámetros y del nivel de deterioro del pavimento en el momento de evaluar la sensibilidad.

Tomando en cuenta lo anterior, no se pretende que los resultados obtenidos se tomen como una referencia inequívoca para determinar el impacto de los parámetros, sino como una guía para evaluar la sensibilidad de los modelos en las condiciones particulares en que se utilicen.

2. La programación de los modelos por separado permitió comprender mejor la lógica de funcionamiento del HDM-4, realizar un análisis más flexible y podría aprovecharse en un futuro para incorporar los algoritmos de cálculo a sistemas de gestión de pavimentos adecuados a las necesidades particulares de los usuarios interesados.
3. Al realizar el análisis de sensibilidad se detectaron algunas particularidades de los modelos que no se encuentran documentadas en los manuales del sistema.
4. Entre los grupos de parámetros con mayor impacto en los modelos de deterioro pueden mencionarse los siguientes: capacidad estructural del pavimento, estado al inicio del periodo de análisis; tránsito; calidad de construcción y factores climáticos.
5. El agrietamiento y, en particular, el agrietamiento ancho, desempeña un papel fundamental en el procedimiento de cálculo empleado para pronosticar del deterioro, ya que constituye uno de los principales precursores de baches, los cuales, a su vez, condicionan en forma determinante la degradación del pavimento.
6. La metodología utilizada puede aplicarse para evaluar la sensibilidad de los modelos de deterioro en términos de resultados de referencia adicionales, así como la de otros grupos de modelos del HDM-4.

Referencias

1. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993*. Washington, DC, Estados Unidos de América. AASHTO, (1993).
2. American Society for Testing and Materials (ASTM) “Standard Guide for Network Level Pavement Management” (Norma ASTM E 1166 – 00) En *Annual Book of ASTM Standards 2003*. Sección 4, *Construction*; volumen 04.03, *Road and Paving Materials – Vehicle-Pavement Systems*. West Conshohocken, PA, Estados Unidos de América. ASTM International, (2003).
3. Archondo-Callao, Rodrigo. *Análisis de sensibilidad del HDM-4*. División de Transportes, Departamento de Transportes, Aguas y Desarrollo Urbano, Banco Mundial, (nov 1996).
4. Arroyo Osorno José Antonio y Aguerrebere Salido Roberto. “Estado superficial y costos de operación en carreteras”. *Publicación Técnica No. 202*. SanFandila, Qro. Instituto Mexicano del Transporte, (2002).
5. Bennett, Christopher R; William D.O. Paterson. *HDM-4: Highway Development and Management. Volume Five: A Guide to Calibration and Adaptation*. París, Francia. Asociación Mundial de Carreteras (PIARC), (2000).
6. Kerali, Henry G.R. *HDM-4: Highway Development and Management. Volume One: Overview of HDM-4*. París, Francia. Asociación Mundial de Carreteras (PIARC), (2000).
7. Odoki J B y Henry G R Kerali *HDM-4: Highway Development and Management. Volume Four: Analytical Framework and Model Descriptions*. París, Francia. Asociación Mundial de Carreteras (PIARC), (2000).
8. Sayers, Michael W.; Thomas D. Gillespie; Cesar A.V. Queiroz. “The International Road Roughness Experiment”. *World Bank Technical Paper Number 45*. Washington, DC, Estados Unidos de América. The World Bank, (1986).
9. Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) *Peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal*. México, DF SCT, (2002).
10. Solminihac Tampier, Hernán de. *Gestión de Infraestructura Vial*. 2a. ed., Santiago, Chile. Ediciones Universidad Católica de Chile, (2001).
11. Solorio Murillo José Ricardo y García Hernández Silvino. *Estudio exploratorio de la sensibilidad del modelo HDM-4*. Documento interno, Instituto Mexicano del Transporte, (2002).



‡ **Certificación ISO 9001:2000 según documento No 03-007-MX, vigente hasta el 24 de octubre de 2006 (www.imt.mx)**

§ **Laboratorios acreditados por EMA para los ensayos descritos en los documentos MM-054-010/03 y C-045-003/03, vigentes hasta el 9 de abril de 2007 (www.imt.mx)**

CIUDAD DE MÉXICO

Av Patriotismo 683
Col San Juan Mixcoac
03730, México, D F
tel (55) 5598-5610
fax (55) 55 98 64 57

SANFANDILA

km 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro
tel (442) 216-9777
fax (442) 216-9671

www.imt.mx
publicaciones@imt.mx