

Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**ANÁLISIS DE LA EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE PROYECTOS
VIALES CON EL MODELO DE ESTANDARES DE CONSERVACIÓN Y
DISEÑO DE CARRETERAS**

José Angel Hanser López
Asesorado por el Ing. Byron Otoniel Ramos Sánchez

Guatemala, agosto de 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE LA EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE
PROYECTOS VIALES CON EL MODELO DE ESTANDARES DE
CONSERVACIÓN Y DISEÑO DE CARRETERAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

JOSE ANGEL HANSER LOPEZ

ASESORADO POR EL ING. BYRON OTONIEL RAMOS SANCHEZ
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, AGOSTO DE 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing.	Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL 1º.	Inga.	Glenda Patrica García Soria
VOCAL 2º.	Inga.	Alba Maritza Guerrero De López
VOCAL 3º.	Ing.	Miguel Angel Dávila
VOCAL 4º.	Br.	Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL 5º.		
SECRETARIA	Inga.	Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing.	Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing.	Guillermo Melini Salguero
EXAMINADOR	Ing.	Mario Corzo Ávila
EXAMINADOR	Ing.	Armando Fuentes Roca
SECRETARIA	Inga.	Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS DE LA EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE PROYECTOS VIALES CON EL MODELO DE ESTANDARES DE CONSERVACIÓN Y DISEÑO DE CARRETERAS,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 4 de julio de 2008.

José Angel Hanser López

ACTO QUE DEDICO A:

DIOS

MIS PADRES: JOSÉ ANGEL HANSER CANO (D.E.P)
HERMINIA LÓPEZ ORDOÑEZ

MI ESPOSA: SINIA LISETTE RUANO DE HANSER

MIS HIJOS: MARÍA FERNANDA
ISAIAS JOSÉ ANGEL (D.E.P)
JOSÉ ALEJANDRO

MIS HERMANOS: SANDRA MARIBEL
LUIS ORLANDO
MARÍA JULIA
JUAN JOSE
INGRID

MIS SOBRINOS: SERGIO ROLANDO
LESLY JULISSA

MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS

AGRADECIMIENTOS A:

- MI QUERIDA MADRE: Por su amor incondicional, comprensión y sabios consejos, que todos los días de mi vida han permanecido.
- JULITA Y SANDRA HANSER: Por su apoyo y ayuda constante en mis estudios.
- ING. MARCO T. PAEZ: Por ser ejemplo de valores humanos, durante mis estudios y mi futura carrera profesional.
- ING. BYRON RAMOS: Por su valiosa cooperación y experiencia en la elaboración de este trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. GESTIÓN DE PAVIMENTOS	1
1.1 Niveles de gestión de pavimentos	8
1.2 Descripción de los elementos a nivel de red	12
1.2.1 Inventario	12
1.2.2 Evaluación de la condición de los pavimentos	14
1.2.3 Determinación de las necesidades de financiamiento	17
1.2.4 Priorización de secciones candidatas	19
1.2.5 Determinación de los efectos o impactos de las decisiones presupuestarias	20
1.3 Descripción de los elementos a nivel de proyecto	21
1.3.1 Diseños nuevos	23
1.3.2 Tratamientos de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción de carreteras	26
1.3.3 Selección de la mejor estrategia	31
1.4 Relación entre los elementos a nivel de red y a nivel de proyecto	34
1.5 Importancia de los sistemas de gestión de pavimentos SGP	35
1.6 Beneficios de la administración de pavimentos	36
2. MODELOS DE DETERIORO DEL PAVIMENTO	39
2.1 Generalidades	39

2.2	Gestión de proyectos de pavimentos	39
2.3	Modelos de deterioro de los pavimentos	40
2.4	Técnicas para el desarrollo de los modelos	42
2.4.1	Extrapolación lineal	42
2.4.2	Regresión	44
2.4.3	Distribución de probabilidad	45
2.4.4	Modelo de deterioro de pavimentos asfálticos (HDM)	46
2.5	Calibración de los modelos de deterioro	47
3.	VISIÓN GENERAL DE HDM	51
3.1	Antecedentes del HDM	51
3.1.1	Desarrollos pasados HDM	52
3.1.2	Objetivos del desarrollo del HDM	53
3.2	El papel del HDM en la gestión de carreteras	54
3.2.1	Gestión de carreteras	54
3.2.1.1	Planificación	54
3.2.1.2	Programación	55
3.2.1.3	Preparación	56
3.2.1.4	Operación	57
3.2.2	El ciclo de gestión	58
3.2.3	Funciones de la gestión	59
3.3	Aplicaciones del HDM	61
3.3.1	Análisis de estrategias	61
3.3.2	Análisis del programa	64
3.3.3	Análisis del proyecto	67
3.4	Necesidad de datos	69
3.4.1	Visión general	69
3.4.2	Configuración de HDM	69
3.4.3	Redes de carreteras	70

3.4.4	Parques de vehículos	71
3.4.5	Obras	72
4.	APLICACIÓN DEL HDM A UN PROYECTO DE CARRETERAS	73
4.1	Generalidades	73
4.2	Costo del sistema de transporte por carretera	74
4.3	Datos técnicos de campo	77
4.3.1	Composición del tráfico promedio anual (TPDA)	77
4.3.2	Proyecciones del tránsito	77
4.3.3	Tipos de tránsito	77
4.4	Indicadores de rentabilidad	78
4.5	Análisis de sensibilidad	79
5.	EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL PROYECTO CON HDM	81
5.1	Generalidades	81
5.2	Datos ingresados a HDM	82
5.2.1	Datos para el control del análisis	82
5.2.2	Datos de la situación actual de la carretera	83
5.2.3	Datos de los vehículos	84
5.2.4	Datos sobre las estrategias asignadas	89
5.2.5	Datos de los factores de deterioro	89
5.2.6	Datos de los impactos sobre el usuario	90
5.3	Corrida del programa HDM	92
5.4	Análisis de resultados	105
	CONCLUSIONES	107
	RECOMENDACIONES	109
	BIBLIOGRAFÍA	111

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Efectos del tratamiento oportuno sobre los gastos de recuperación sobre inversiones en redes de carreteras.	5
2.	Componentes del inventario físico vial	14
3.	Procedimiento para la creación de un modelo de deterioro	42
4.	Extrapolación lineal	44
5.	Distribución de probabilidades	45
6.	Ciclo de gestión de carreteras	59
7.	Funciones de la gestión y las aplicaciones del HDM	60
8.	Salida de ejemplo de análisis del programa HDM	67
9.	Gráfica de costos contra beneficios	74
10.	Costos del sistema de transporte por carretera	75
11.	Situación de la carretera antes de la intervención	76
12.	Situación de la carretera después de la intervención	76
13.	Arquitectura del modelo HDM	82

TABLAS

I.	Margen de valores de los indicadores de rentabilidad	79
II.	Valores de tráfico promedio diario anual (TPDA)	84
III.	Características físicas de los vehículos	85
IV.	Características de la utilización de los vehículos	86
V.	Costos económicos unitarios de los vehículos	87
VI.	Precios de los combustibles	88
VII.	Costos unitarios de operación	88
VIII.	Índice de daño superficial	90

IX.	Parámetros de costos de operación vehicular	91
X.	Situación con y sin proyecto	92
XI.	Costo por kilometro con y sin proyecto	93
XII.	Alternativas de inversión menos costosas definidas por el HDM, según ejemplo	94
XIII.	Costos de mantenimiento con y sin proyecto	95
XIV.	Costos de operación vehicular con y sin proyecto	96
XV.	Transito promedio anual esperado	97
XVI.	Costo de operación vehicular sin proyecto por año	98
XVII.	Costo de operación vehicular con proyecto por año	99
XVIII.	Ahorros en costo de operación vehicular del proyecto por año	100
XIX.	Evaluación económica del proyecto por el programa HDM	101
XX.	Sensibilidad económica: Incremento del 20% de los costos	102
XXI.	Sensibilidad económica: Decremento del 20% de los beneficios	103
XXII.	Sensibilidad económica: + 20% de los costos y -20% de beneficios	103
XXIII.	Resumen del análisis de sensibilidad	105

GLOSARIO

Agencias de carreteras	Instituciones Guatemaltecas encargadas de conservar, mejorar o construir carreteras. Entre ellas la Instituciones del Estado, Iniciativa Privada y Municipalidades.
Bacheo en carreteras	Sustitución de las diferentes capas incluyendo el pavimento que conforman la estructura de la carretera, en las zonas inestables bajo la estructura del pavimento.
Base	Es la capa de espesor diseñado, constituyente de la estructura del pavimento, destinada fundamentalmente a distribuir y transmitir las cargas originadas por el tránsito, a las capas subyacentes y sobre la cual se coloca la carpeta de rodadura.
Clasificación funcional	Clasificación que se le da a una red de carreteras con relación descendente al nivel de servicios que presta a los usuarios.
Conservación periódica	Mantenimiento que previene el deterioro de la superficie de rodadura de una carretera.
Conservación rutinaria	Mantenimiento destinado a la limpieza del derecho de vía y estructuras de drenaje de una carretera.

Costo operacional vehicular	Costos del vehículo que representa un significativo gasto para el automotor y sus pasajeros.
Doble tratamiento superficial	Doble capa de revestimiento formada por riegos sucesivos y alternados con material bituminoso y agregados pétreos triturados de tamaño uniforme, que mediante el proceso de compactación son acomodados y orientados en su posición más densa.
Ejes equivalentes	Cargas equivalentes de ejes sencillos estándar de 8.2 toneladas
Gestión vial	Manejo de los elementos de la infraestructura vial a través de un conjunto complementario de actividades que permiten un comportamiento armónico de la estructura.
Hombro	Las áreas de la carretera, contiguas y paralelas a la carpeta o superficie de rodadura, que sirven de confinamiento a la capa de base y de zona de estacionamiento accidental de vehículos.
Infraestructura Vial	Conjunto de elementos que permiten el desplazamiento entre vehículos en forma confortable y segura: pavimento, puentes, túneles, dispositivos de seguridad, señalización, etc.

Inventario vial	Conjunto de datos que determinan las características físicas de un tramo de carretera.
Mejoramiento	Ejecución de las actividades necesarias para dotar a una carretera existente de mejores condiciones físicas y operativas de las que disponía anteriormente, para ampliar su capacidad o simplemente ofrecer un mejor nivel de servicio.
Pavimento	La estructura integral de las diferentes capas colocadas sobre la subrasante, destinadas a soportar las cargas vehiculares.
Rugosidad	Es la desviación vertical del perfil de un pavimento y su cuantificación es por medio del índice de rugosidad internacional IRI.
Superficie de rodadura	La parte superior de un pavimento, por lo general de pavimento bituminoso o rígido, que sostiene directamente la circulación vehicular.
Sección transversal	Vista vertical a través de la carretera perpendicular a la línea central
Sub base	Capa granular localizada entre la base y la sub rasante seleccionada cuidadosamente para transmitir la cargas provenientes de la base a la sub rasante.

Supuestos presupuestarios	Presupuestos preparados con un margen de variación.
Sistema	Modelo de ordenamiento que se aplica en una determinada organización y que opera en un entorno cambiante (Kováčević, 1990)
Viga Venkelman	Ensayo no destructivo que se realiza para determinar las deflexiones sobre una superficie de pavimento.

RESUMEN

Este estudio muestra como el Software Modelo de estándares de conservación y diseño de carreteras (HDM, siglas en inglés), se relaciona de manera directa con la aplicación y manejo de un Sistema de Gestión de Pavimentos (SGP).

Mucha de la información fue extraída de estudios realizados en México, Perú, Chile y Colombia, además de manuales propios del HDM, los cuales en conjunto nos expresan la operación de un sistema de gestión de pavimentos y como el HDM es utilizado para facilitar el manejo de datos, para proporcionar estrategias de conservación y mejoramiento de un tramo o una red de carreteras, a partir de una evaluación económica.

El objetivo principal es dar a conocer el HDM, para empezar a crear una base de información respecto al tema, debido a que en Guatemala se conocen muy poco sobre gestión de pavimentos, por lo que se muestra como se aplica a un proyecto de carreteras para determinar la viabilidad de la inversión.

Durante el desarrollo de los capítulos, el estudio presenta los principios básicos de la administración de pavimentos, de cómo nace el HDM a partir de modelos de deterioro de pavimento existentes, además de una visión general del HDM para su aplicación a un proyecto de carreteras. Por último, la evaluación técnica y económica que ayuda en la toma de decisiones de una institución gestora de pavimentos.

OBJETIVOS

- **Generales**

1. Establecer mediante el estudio un modelo único de gestión de pavimentos, utilizando esta herramienta para justificar cada vez mayores presupuestos de conservación y mejoramiento de carreteras.
2. Derivado de esto, optimizar los beneficios económicos de usuarios de carreteras pavimentadas bajo diferentes niveles de gasto. Para predecir las necesidades a medio y largo plazo de un proyecto de carreteras pavimentadas.

- **Específicos**

1. Conocer los principios básicos de los Sistemas de Gestión de Pavimentos. Analizar cómo se relacionan los sistemas de gestión de pavimentos con el modelo de estándares de conservación y diseño de carreteras HDM.
2. Analizar los modelos de deterioro de pavimento con el desarrollo del HDM.
3. Presentar un enfoque básico del HDM, de donde nace, como se desarrolla y las aplicaciones a redes de carreteras.
4. Analizar la evaluación técnica y económica de un proyecto de carreteras, mediante un ejemplo de aplicación.

INTRODUCCIÓN

En Guatemala se considera que la infraestructura vial principal son las carreteras pavimentadas con una extensión de 10,000 km aproximadamente, de la cual el 50% se estima en regulares condiciones dejando el otro 50% de ellas en estado medio o deficiente de servicio. Con el paso del tiempo,

La funcionalidad de estas estructuras y el alto nivel de sobrecarga a su diseño original consecuencia de vehículos con cargas más pesadas por las exigencias de nuevos mercados, se crea la necesidad año con año, que para su adecuada conservación, mantenimiento y mejoramiento, las organizaciones de carreteras de Guatemala inviertan cientos de millones de quetzales, muchos de los cuales son inalcanzables para resolver los problemas que eventualmente se dan en la infraestructura de la carretera, ocasionando que los montos y recursos sean insuficientes a los que se estiman a tan importante renglón que estimula la actividad económica, desarrollo social, y crecimiento integral de un país.

La situación descrita, muestra una condición de significativa carencia de recursos en relación con las necesidades reales. Esta situación prevalece en muchas redes viales del mundo. Por tal razón, desde la década de los años ochenta, se han venido utilizando, cada vez con mayor frecuencia, los denominados "Sistemas de Gestión de Pavimentos o SGP".

Los SGP tienen como finalidad ayudar a elaborar programas de conservación de carreteras, justificar con eficiencia técnica y financiera nuevos proyectos que distribuyan las tareas que más convenga realizar, para poder optimizar los recursos limitados y disponibles, a partir de una base de datos obtenida del estado de la rodadura de la carretera, de un inventario vial, de los datos del tránsito (TPDA) y de factores climáticos de la región.

Existen comercialmente una gran cantidad de estos sistemas, compuestos por manuales, formatos, programas de cómputo, etc.

Los sistemas empleados comúnmente en los países de América Latina son: *Highway Design and Maintenance Standards Model (HDM-III) y (HDM4)*" o Modelos de estándares de conservación de carreteras, elaborados por el Banco Mundial.

Como la mayoría de los sistemas de administración de pavimentos, el HDM-III y HDM4 parte de una base de registros o inventarios referentes a las características importantes del estado físico actual de los distintos componentes de la red de carreteras, así como de sus solicitudes a futuro (expectativas de tránsito).

La importancia en estos modelos de gestión, radica, en que son una herramienta poderosa para la toma de decisiones a las posibles alternativas de inversión sobre los proyectos de carreteras gestionados, dando variables justificables como lo son un análisis económico incluyendo factores de tasa interna de retorno (TIR), valor actual neto (VAN) y el valor presente neto (VPN).

1. GESTIÓN DE PAVIMENTOS

Los sistemas de gestión de pavimentos, de aquí en adelante (SGP) involucran distintas actividades que ayudan a la planeación, diseño, construcción, evaluación y conservación de los pavimentos de una red de carreteras.¹

Los SGP constituyen una de las funciones más importantes para las organizaciones que tienen a su cargo el desarrollo y la preservación de infraestructura vial.

En un concepto generalizado los SGP pueden 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 involucrados².

Por medio de la Norma ASTM E1166 – 00, el manejo de un sistema de gestión de pavimentos integra los siguientes componentes³

- Ubicación geográfica: 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.

¹ Normas AASHTO, 1993

² Solminihac, 2001

³ Normas ASTM, 2003

Entre los métodos más utilizados pueden mencionarse el sistema arco-nodo, el cadenamiento y las coordenadas geográficas, este último utilizado en Guatemala por medio de GPS.

- Datos de campo utilizables por el sistema:
 - a) Inventario vial: 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 (Sub rasante, sub base y base) así como características del drenaje e historial de reparaciones.
 - b) Estado del pavimento: expresado en términos de la irregularidad de la superficie de rodamiento (IRI), presencia y magnitud de deterioros, deflexiones y otros parámetros de la capacidad estructural del pavimento, espesores y propiedades reales de las capas de rodadura; resistencia al deslizamiento, 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, y rehabilitación 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 COV, costos asociados con el valor del tiempo de pasajeros, la demora de mercancías, y costos de accidentes.

- Manejador de bases de datos: dependiendo del tamaño de la red por analizar, el volumen de información requerido por los SGP 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 (HDM u otros sistemas).

- 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 beneficio/costos, tasa interna de retorno y valor actual neto.

 - 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.

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.

En consecuencia, se requiere de un plan organizado 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.

Como resultado de la recopilación de datos, el manejo y análisis de los mismos depende de la habilidad suficiente para aprovechar tan importante información, por lo que se crean los SGP.

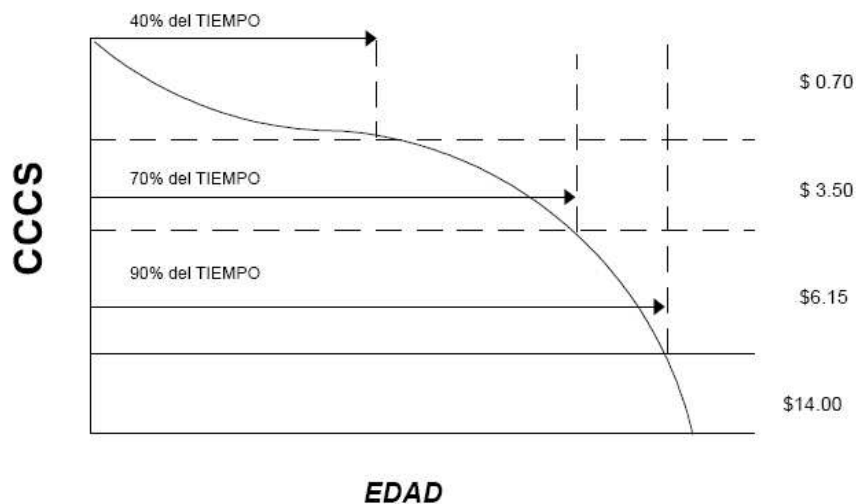
Actualmente, se utiliza y se impulsa en Guatemala por medio de la Dirección General de Caminos y COVIAL el HDM, al que nos referimos en el presente informe.

Debido a que todas las superficies de los caminos se deterioran con el tiempo debido al tránsito y al medio ambiente. La Figura 1 muestra la tasa promedio de deterioro y el cambio de los costos de reparación a medida que el pavimento se deteriora.

El término CCCS (calificación compuesta de condición superficial) es una medida o índice de la condición de un pavimento (sus valores altos representan una condición mejor que sus valores bajos).

Es evidente que el costo total será menor si el pavimento se repara oportunamente. La figura también indica que el costo será menor para la entidad administradora que proporciona el mantenimiento.

Figura 1. Efectos del tratamiento oportuno sobre los gastos de recuperación sobre inversiones en redes de carreteras



Fuente: Instituto Mexicano de Transporte, Aplicación del HDM-III a la red carretera federal del estado de Puebla, Pág. 5

Las prácticas de administración o gestión de pavimentos se basan en el concepto de encontrar una combinación económica de medidas a aplicar en cualquier momento para poder obtener un nivel de servicio deseado.

Los SGP que utilizan el HDM pueden evaluar varias estrategias, usan los efectos esperados de las medidas de mantenimiento y rehabilitación sobre el comportamiento futuro de la superficie de los caminos para identificar aquellas secciones que necesiten un tratamiento, así como la combinación de medidas preventivas que proporcionen una condición global deseada, considerando las restricciones impuestas, pudiendo ser estas sociales, económicas o políticas.

Estas herramientas, como HDM se consideran un asistente técnico para la toma de decisiones para los proyectos de carreteras, el financiamiento, las oportunidades de desarrollo, y los intereses político-sociales.

Los sistemas como HDM hacen que la persona responsable de las decisiones de la unidad administradora de pavimentos tome decisiones de relevancia económicas en lo que se refiere al mantenimiento y rehabilitación de pavimentos.

El personal de una organización es el que administra los pavimentos y el que toma las decisiones. Los programas de computadora como el HDM solamente asisten en la administración de la información y apoyan a la toma de decisiones.

Además proveen los instrumentos para organizar una cantidad enorme de datos que se desarrollan en una red carretera, lo cual hace fácil el manejo de la información de una manera ordenada y definida por grupos separativos de calidad e importancia de información.

Cuando el almacenamiento y los análisis de datos se automatizan, los sistemas como HDM guardan los datos, los recupera y realiza cálculos múltiples y complejos en una forma rápida y eficiente.

En general, el término gestión de pavimentos se usa para describir la administración de redes de carreteras, con superficies pavimentadas y no pavimentadas.

En este estudio se hace referencia exclusivamente a superficies pavimentadas con estructuras flexibles de varias capas, de las cuales la más superficial es de concreto asfáltica, doble tratamiento etc.

Desde un punto de vista amplio, la administración de pavimentos cubre todas las fases de la planeación, programación, análisis, diseño, construcción e investigación de los pavimentos.

Puede llegar a considerar tanto las necesidades de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción de pavimentos existentes, como las necesidades de áreas adicionales de pavimento para aumentar la capacidad vial.

Estos sistemas generalmente no incluyen el mantenimiento rutinario (limpieza y reparación de taludes, señales, etc), el cual suele enfrentarse a través de un presupuesto anual fijo reducido, que no requiere de un sistema o estrategia de gestión.

Trata también sobre los requerimientos de los trabajos seleccionados y las normas a seguir en ellos. La planificación de actividades programadas de mantenimiento normalmente se desarrolla dentro de un sistema de administración de pavimentos o uno de superficie de caminos.

1.1 Niveles de gestión de pavimentos

La gestión de pavimentos generalmente se desarrolla a dos niveles, a nivel de red y a nivel de proyecto. Las diferencias entre el nivel de red y el de proyecto se extienden más allá del nivel en el cual se toman las decisiones e incluyen diferencias en la cantidad y el tipo de datos que se requieren.

La recolección de datos es costosa y a menudo no se sabe con exactitud qué tipo, ni qué cantidad de ellos serán requeridos, hasta que parte de los datos hayan sido recolectados.

Para evitar este problema, a nivel de red normalmente se recolecta una cantidad mínima de datos, se entiende por una red completa de carreteras, la red vial primaria pavimentada de Guatemala en las que se incluyen las rutas Centroamericanas CA, algunas rutas departamentales RD y rutas nacionales RN.

Esto permite que el SGP sea implementado con un monto de inversión inicial, bajo la recopilación de datos; sin embargo, los datos recopilados a nivel de red no son los más adecuados para tomar la mayoría de las decisiones a nivel de proyecto, debido a que consideran una pequeña cantidad de datos de forma generalizada.

Se deben recolectar más datos de las secciones de pavimento individuales identificadas como candidatas prioritarias para construcción, mantenimiento o rehabilitación por el análisis a nivel de red (es decir, a nivel de proyecto se requiere la información de detalle necesaria para el diseño de las medidas más adecuadas, pero sólo para las secciones candidatas prioritarias, para las que tiene una condición superficial muy mala).

La necesidad de minimizar los costos de la recolección de datos es una razón para separar los elementos de gestión de pavimentos en elementos a nivel de proyecto y a nivel de red. La diferencia en el nivel de decisión normalmente se encuentra en la cantidad de pavimento que se considere y también en el propósito de la decisión.

La cantidad de pavimento que se considera a nivel de proyecto normalmente consiste en un tramo o sección sencilla a gestionar, la cual a veces corresponde a una sección original de construcción, aunque las secciones pueden ser combinadas o subdivididas para propósitos de análisis.

El propósito del proceso de gestión a nivel de red se relaciona con el proceso presupuestario, para identificar las necesidades de trabajo de mantenimiento y rehabilitación de pavimentos, la selección de secciones a repararse o mantener y la determinación de los efectos de las varias opciones sobre el comportamiento del sistema de todos los pavimentos de la red y sobre el bienestar global de la comunidad.

La parte que trata de la selección de secciones a financiarse en determinados períodos se denomina como selección y programación de proyectos.

Los resultados principales de los análisis a nivel de red incluyen las necesidades de mantenimiento y rehabilitación, las necesidades de financiamiento, y un listado priorizado de las secciones o tramos candidatos que necesitan reparación con un pronóstico de las condiciones futuras de la red para varias opciones de financiamiento.

A nivel de proyecto, el propósito es determinar la estrategia más económica de diseño inicial, así como de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción durante el período de vida de una sección de pavimento seleccionada, dado el financiamiento disponible.

Los resultados principales de la gestión de pavimentos a nivel de proyecto incluyen una evaluación de las causas del deterioro, identificación de las estrategias posibles de diseño, mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción y la selección de la estrategia más económica a seguir durante el período de vida de la sección, dadas las restricciones impuestas. Este proceso requiere de una cantidad considerable de datos detallados para la sección considerada.

A nivel de red se analiza toda la red considerada, con el mínimo de datos de ella para generar programas de conservación preliminares (para un horizonte de tiempo dado, 20 años), utilizados principalmente para la gestión de los recursos.

A nivel de proyecto se consideran sólo los tramos carreteros con mayor urgencia de actuación (Un mantenimiento rutinario, como bacheo o sello de grietas), determinándose para ellos las medidas definitivas a aplicar.

No todos los datos que se necesitan para tomar las decisiones a nivel de proyecto son requeridos para tomar las decisiones a nivel de red.

Generalmente, las decisiones a nivel de red pueden ser tomadas con una cantidad menor de datos que aquéllos que se requieren para tomar decisiones específicas sobre una sección a nivel de proyecto.

Para reducir los costos de implementar un SGP, solamente se recolecta la cantidad mínima de datos requeridos y únicamente cuando sean necesarios.

La gestión de pavimentos a nivel de proyecto básicamente consiste en los análisis y diseños de ingeniería que se requieren para desarrollar la estrategia más efectiva (de mayor factibilidad económica) de diseño, mantenimiento o rehabilitación para una sección específica de pavimento.

Algunos se refieren a este proceso como análisis de proyecto o diseño de proyecto, en vez de gestión de pavimentos a nivel de proyecto. Las secciones que necesitan trabajos de mantenimiento y rehabilitación (e incluso reconstrucción) serán seleccionadas para reparación, por el SGP a nivel de red.

Debido a la necesidad de evaluar la condición de los materiales ya en su lugar, el diseño de un trabajo de rehabilitación pudiera requerir más ingeniería que el diseño de un pavimento nuevo (en el que muchos de los parámetros se asumen o se obtienen mediante pruebas de laboratorio).

El tamaño del proyecto y la importancia de la vía para la agencia de carreteras determinan la cantidad de tiempo y fondos a gastarse en la evaluación a nivel de proyecto.

Los pavimentos sobre vías principales con alto tránsito deben sujetarse a una mejor evaluación que aquéllos sobre caminos o vías de bajo tránsito.

Todos los conceptos y los procedimientos de evaluación descritos son válidos para cualquier calle o carretera, independientemente del volumen de tránsito. Lo único que varía es la cantidad de pruebas a realizar y el tiempo que se dedique para arribar a conclusiones.

1.2 Descripción de los elementos a nivel de red

Esta sección trata principalmente de los elementos a nivel de red; en ella se proporciona una descripción breve de un SGP a nivel de red. Como se explicó en al principio del capítulo los elementos básicos de un SGP a nivel de red son:

- Inventario vial.
- Evaluación del estado de rodadura.
- Determinación de las necesidades de financiamiento.
- Identificación de proyectos candidatos a financiar.
- Método para determinar el impacto o los efectos de las decisiones de financiamiento sobre las condiciones futuras y el financiamiento futuro.
- Proceso de retroalimentación.

1.2.1 Inventario vial

El inventario de la red vial proporciona información sobre la cantidad de pavimentos que el administrador es responsable de gestionar, información sobre la ubicación de las secciones de pavimento e información básica relacionada con las secciones de pavimentos dentro de la red.

Es imposible administrar una red de pavimentos como una sola unidad; una tarea importante del proceso de implementación de un SGP es la división de la red en secciones o tramos a administrar. El inventario proporciona información básica sobre la ubicación y la conectividad de cada sección de gestión dentro de la red.

Se usan dos conceptos generales para dividir la red en secciones de gestión. En el primero, la red se divide en tramos de un largo uniforme por ejemplo en tramos de 1,000.00 metros y si se desea, los tramos pueden ser combinados para el análisis.

En el segundo concepto, se definen secciones de gestión que serán tratadas por el administrador como unidades completas y a las cuales normalmente se les aplicará el mismo tratamiento de mantenimiento, un bacheo rutinario, sello de grietas etc.

Cualquiera de los dos conceptos puede ser utilizado y ambos tienen ventajas y desventajas. Cada tipo de datos requiere de tiempo, esfuerzo y dinero para recolectarse, guardarse, extraerse y usarse.

Los elementos que generalmente se requieren para cada sección de administración incluyen: identificación, ubicación, número de carriles de tránsito, clasificación funcional, área, tipo de superficie, niveles de tránsito y fecha en la cual la superficie existente fue construida.

Adicionalmente, otros datos que pudieran ser útiles son: información sobre el drenaje, información de los carriles de estacionamiento e información sobre la geografía y el medio ambiente.

En Guatemala la Unidad Ejecutora de Conservación Vial COVIAL, a través de las Supervisoras hace un inventario vial, como parte del desarrollo de su SGP, año con año requiere de la información de campo para construir el inventario físico vial⁴.

Figura 2. Componentes del inventario físico vial

No.	DESCRIPCION
1	UBICACIÓN DE BASUREROS CLANDESTINOS
2	UBICACIÓN DE BANCOS DE PRESTAMO
3	BORDILLOS LONGITUDINALES
4	BOVEDAS Y ALCANTARILLAS
5	DEFENSAS METALICAS
6	DRENAJE LONGITUDINAL (CUNETAS)
7	DRENAJE TRANSVERSAL (TUBERIAS)
8	LONGITUD DE TRAMOS
9	MUROS DE PROTECCION LATERAL
10	POBLACIONES QUE SE PASAN
11	PUENTES DE CONCRETO
12	PUENTES DE METAL
13	PUENTES DE MADERA
14	TIPO DE RODADURA
15	SEÑALIZACION HORIZONTAL
16	SEÑALIZACION VERTICAL
17	GEOMETRIA DE LA SECCION TRANSVERSAL
18	TALUDES INESTABLES
19	TUMULOS
20	PLANIMETRIA Y ALTIMETRIA DE LOS TRAMOS (GPS)

**Fuente: UNIDAD EJECUTORA DE CONSERVACION VIAL COVIAL,
Especificaciones Especiales 2008, Pág. 164**

1.2.2 Evaluación del estado de rodadura

La evaluación de la condición de un pavimento empieza con la recolección de datos para determinar el tipo, la cantidad, la severidad de los deterioros superficiales, la integridad estructural, la calidad de circulación y la resistencia al deslizamiento del pavimento.

⁴ Especificaciones Especiales 2008, División 1400, Sección 1401 - NORMAS PARA SUPERVISION, 1401.03, Actividades inmediatas a iniciar la labor de supervisión, literal e.)

Los datos sobre la condición de los pavimentos son necesarios para la evaluación y determinación de las necesidades de trabajos de mantenimiento y rehabilitación; también se usan para pronosticar el comportamiento del pavimento, establecer las estrategias de mantenimiento y rehabilitación y para ayudar a optimizar el financiamiento disponible para esos trabajos. Para poder medir la condición del pavimento se utilizan los siguientes parámetros.

- Deterioro superficial: se refiere al daño o deterioro en la superficie del pavimento. Normalmente se realizan estudios para determinar el tipo, la severidad y la cantidad de los defectos superficiales. Esta información se usa con frecuencia para determinar un índice o calificación de condición superficial (CCCS), el cual sirve para calcular la tasa de deterioro y pronosticar la condición futura. El deterioro superficial y los valores de (CCCS) actuales o futuros se utilizan para identificar el momento oportuno para realizar los trabajos de mantenimiento y rehabilitación, así como las necesidades monetarias requeridas en el proceso de la gestión de pavimentos. El nivel de defectos superficiales es la medida más común utilizada por el personal de mantenimiento para determinar el tipo y momento oportuno del mantenimiento requerido.
- Capacidad estructural: se refiere a la máxima carga y el máximo número de repeticiones que un pavimento puede soportar. Normalmente, se realiza un análisis estructural para determinar la capacidad de carga actual y la capacidad necesaria para soportar el tránsito proyectado. Los ensayos de deflexión no-destructivos como Viga Venkelman, del pavimento son un método simple y confiable para realizar esta evaluación; sin embargo, también pueden utilizarse técnicas de muestreo mediante cilindros y taladros tubulares.

- Rugosidad: es una medida de la distorsión de la superficie del pavimento o un estimado de la habilidad de éste para proporcionar un viaje confortable a los usuarios. Se evalúa mediante una calificación que trata de representar la opinión de los usuarios sobre la calidad de circulación actual que el pavimento les proporciona (calificación de servicio actual, CSA) o mediante algún índice correlacionado con esa opinión, como es el Índice Internacional de Rugosidad (IIR). La rugosidad del pavimento es considerada por el público como la medida más importante, especialmente en aquellos pavimentos con elevados límites de velocidades (por arriba de los 70 kilómetros por hora).
- Resistencia al derrapamiento: se refiere a la habilidad del pavimento de proporcionar la fricción suficiente para evitar los problemas de seguridad asociados con los derrapamientos o deslizamientos. La resistencia al deslizamiento es más importante para los pavimentos de las vías rápidas y generalmente se le considera como una medida separada de la condición; a menudo puede utilizarse por sí misma para determinar la necesidad de realizar algún tipo de trabajo correctivo.

Los cuatro factores anteriores de condición pueden ser utilizados para determinar la condición global del pavimento e identificar el tratamiento de mantenimiento y rehabilitación económicamente más efectivo.

El grado de importancia de estos factores en términos del comportamiento del pavimento y de las necesidades de mantenimiento y rehabilitación varía; es obvio que cualquier tratamiento recomendado para corregir un problema de capacidad estructural puede remediar todas las deficiencias que pudieran estar presentes, incluyendo la rugosidad.

Hay muchos métodos que pueden usarse para recolectar cualquiera de las cuatro medidas anteriores. Cada método tiene ventajas y desventajas, pero en general, aquellos procedimientos que requieren menos esfuerzos y costos son los menos exactos. Aquellos que son más exactos son los más costosos y los que toman más tiempo.

La agencia de carreteras debe considerar cuidadosamente el tipo y el nivel de decisiones que se tomarán a partir de las medidas obtenidas, junto con los recursos disponibles, para determinar el método que deba usar. En la mayoría de las agencias de carreteras, las medidas del deterioro y rugosidad se recolectan a nivel de red.

Por lo general, la mayoría de las agencias usan métodos menos exactos para los análisis a nivel de red y utilizan medidas más detalladas para los análisis a nivel de proyecto. Los datos son normalmente recolectados para definir la condición de cada sección individual de gestión identificada en el inventario.

1.2.3 Determinación de las necesidades de financiamiento

Una vez que la red de pavimentos ha sido definida y que los datos de las condiciones han sido recolectados, la condición de las secciones individuales de gestión y la condición global de la red, sin ningún mantenimiento o rehabilitación, pueden ser determinados proyectando los deterioros individuales, la CSA, la CCCS, o alguna combinación de índices, a un tiempo futuro.

Las secciones pavimentadas se seleccionan para mantenimiento y rehabilitación durante un período de análisis, si se cumple con un criterio de decisión establecido, el cual está normalmente basado en la condición, el tipo de superficie, la clasificación funcional y el tránsito, para posteriormente aplicar la evaluación económica.

Los valores mínimos de condición y las categorías de costos asociados con cada uno de ellos deben ser seleccionados basados en un análisis de los niveles de servicio más económicos que la agencia puede proporcionar al público con las restricciones existentes.

Los tratamientos correspondientes a las distintas categorías de costos deben definirse con base en análisis de costos durante la vida útil, para proporcionar la mejor condición por la mínima cantidad de dinero.

Sin embargo, como éstos solamente son tratamientos a nivel de red, sólo deben proveer un costo inicial suficientemente razonable que permita identificar las secciones candidatas y la cantidad de dinero que se necesita para obtener algún objetivo definido por la agencia. En la realidad, algunas secciones candidatas requerirán más dinero de lo estimado, mientras que otras requerirán menos.

El análisis a nivel de proyecto se usa para ajustar los tratamientos, porque requiere de una observación más detallada de las secciones para determinar la medida económicamente más eficiente para la sección específica de pavimento.

Los procedimientos de asignación que relacionan la condición del pavimento con la categoría de costos, generalmente usan una categoría de costo para cada nivel de condición.

Los programas de SGP utilizan técnicas completas de optimización y pueden considerar muchos tratamientos específicos para cada nivel de condición; sin embargo, estos tratamientos generalmente no deben ser aplicados o usados para determinar el presupuesto para una sección de gestión hasta que un análisis más completo sea desarrollado a nivel de proyecto, a no ser que existan datos completos a nivel de red para asignar los tratamientos.

1.2.4 Priorización de secciones candidatas

Una vez que la agencia de carreteras identifica las secciones de la red que necesitan de acciones de mantenimiento o rehabilitación y determina los fondos necesarios para la red en la condición deseada, la agencia debe priorizarla y asignar los fondos monetarios correspondientes.

En la mayoría de los casos, la cantidad de fondos disponibles es menor que la que necesita para completar todas las reparaciones identificadas; aún cuando existen suficientes fondos, ellos generalmente deben ser distribuidos a través de varios años para igualar la cantidad de trabajo con el personal disponible.

Generalmente, el objetivo de priorizar es obtener la mejor condición posible en la red de pavimentos dados los fondos a gastar.

Existe un número de "herramientas de optimización" que están disponibles para determinar la "asignación óptima" de los fondos monetarios. Entre éstas se incluyen la programación lineal, la programación de números enteros, el análisis de decisión de Markov y la programación dinámica.

Hay muchos factores que han impedido el uso verdadero de las herramientas de optimización en la administración de pavimentos. Primero, muchos de los empleados de las agencias se oponen al uso de éstas porque las técnicas que usan son complejas y dan respuestas que ellos no pueden entender rápidamente o explicar.

Se requiere un análisis a nivel de proyecto para seleccionar el mejor trabajo a realizar para una sección específica de pavimento. Secciones adicionales de pavimento se añaden a la lista de secciones candidatas o se mueven a lo largo de los años debido a la proximidad geográfica y a la similitud de los tratamientos, para aumentar las economías de escala durante la construcción.

1.2.5 Determinación de los efectos o impactos de las decisiones presupuestarias.

El objetivo de las agencias de carreteras gubernamentales es proporcionar el máximo beneficio social, utilizando los fondos públicos. Sin embargo, el presupuesto es generalmente asignado por funcionarios que han sido elegidos, y quienes se someten a reelecciones en plazos relativamente cortos.

Estos funcionarios frecuentemente están más interesados en financiar soluciones a corto plazo, de un costo inicial menor, que soluciones a largo plazo y con costo inicial mayor, a pesar que se les muestre que las soluciones a largo plazo son más eficientes económicamente.

Generalmente se requiere una cantidad considerable de justificaciones para lograr que se acepten soluciones a largo plazo. Una de las mejores maneras para justificar las peticiones de presupuestos es enseñar el impacto de distintas alternativas de financiamiento, en la salud de la red vial, en la acumulación de necesidades y en las necesidades futuras de financiamiento.

La integridad de la red de pavimentos se puede mostrar, proyectando la condición promedio de los pavimentos de la red a lo largo de algún período de análisis razonable, en función de los niveles y las varias estrategias de financiamiento, esto se explicará con más detalle en el ejemplo del capítulo 5.

Sin embargo, muchas de las personas que asignan los presupuestos frecuentemente no entienden el significado de los cambios de la condición; generalmente ellos piensan en términos financieros.

Muchas veces es mejor describir la calidad del servicio actual que se está proporcionando y discutir cómo el nivel de financiamiento aumentará o disminuirá; por ejemplo, se podría explicar como el porcentaje de materiales en condición pobre cambiará de un 5% a un 10% en los siguientes cinco años con el nivel de financiamiento actual, pero pudiera mantenerse constante a lo largo del mismo período con un aumento de un 7% en el presupuesto.

1.3 Descripción de los elementos a nivel de proyectos

En esta parte del capítulo se proporciona para distinguir entre las actividades de gestión a nivel de proyecto y de red. La mayoría del personal de ingeniería y de obras públicas tiene más experiencia en las actividades a nivel de proyecto que en una gestión a nivel de red, considerando que un estudio a nivel de red, les interesa a los directivos de alto nivel de la organización.

La materia de esta sección puede enseñar cómo los dos niveles se deben de interrelacionar para desarrollar buenas prácticas de administración. Los elementos de la administración a nivel de red deben de identificar proyectos candidatos para los trabajos programados de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción. Los funcionarios de obras públicas desarrollarían una lista final que entonces se sometería a un análisis a nivel de proyecto.

La gestión de pavimentos a nivel de proyecto es el proceso de análisis y diseño para determinar los tipos y espesores de las capas de materiales que se necesitan para una estructura de pavimento para servir al público.

A pesar de que se pueden usar programas de computadora para diseñar el espesor de las capas de los materiales específicos y para realizar análisis económicos, la mayoría de los procesos deben ser completados fuera de los programas, como parte del proceso de Ingeniería de Detalle, en el que actúan diferentes departamentos de la organización administradora, ejemplo de ello se encuentran los departamentos siguientes, Diseño Geométrico, Transporte, Topografía, Pavimentos, Puentes etc.

Un proceso completo requiere una cantidad considerable de muestreo y pruebas de materiales que tienen lugar tanto en el sitio como en laboratorios.

La gestión de pavimentos a nivel de proyecto generalmente considera diseños de pavimentos nuevos, así como trabajos programados de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción que requieren algún nivel de diseño.

Las necesidades de diseños nuevos pueden ser generadas por un proceso de gestión de tránsito o por otros procesos. Las necesidades de rehabilitación, reconstrucción y mantenimiento pueden ser generadas desde un SGP.

Generalmente, el desarrollo y diseño de los trabajos de mantenimiento es realizado por un grupo dentro de obras públicas distinto al que hace el diseño de construcciones nuevas y rehabilitaciones.

El propósito de la gestión a nivel de proyecto es determinar la alternativa de diseño o tratamiento económicamente más eficiente, para una sección de pavimento que ha sido seleccionada para ser mejorada.

1.3.1 Diseños nuevos

El propósito de un pavimento es proporcionar al público una superficie de rodaje que sea económica, segura y confortable. A pesar que los pavimentos son generalmente considerados como uno de los tipos más simples de estructuras diseñadas por ingenieros, su diseño es bastante complejo.

La mayoría de los pavimentos flexibles están hechos con capas de materiales, sub-base, base y superficie de rodadura; eventualmente todas las cargas son transmitidas al suelo o terreno natural. Los materiales con más resistencia estructural están generalmente ubicados cerca de la superficie para poder resistir las cargas de tránsito, estática y dinámicamente.

Cada capa sucesiva distribuye la carga sobre un área más grande. Las capas más fuertes proporcionan una distribución mayor, lo cual hace que las cargas sean distribuidas sobre áreas más grandes que las que se tendrían con el mismo espesor de un material más débil.

Esta distribución reduce las deflexiones unitarias y los esfuerzos de compresión verticales en las capas subsecuentes inducidos por las cargas.

Estos esfuerzos y deflexiones, si llegan a ser excesivos, pueden causar deflexiones permanentes en la estructura del pavimento causando hundimientos o deformaciones.

Los materiales también deben tener la estabilidad adecuada para resistir las fuerzas cortantes producidas por las cargas de los ejes de los vehículos, sin que exhiban además cualquier otra forma de deformaciones.

Los materiales deben tener la capacidad de resistir las cargas del tránsito sin que desarrollen deflexiones unitarias de tensión excesivas en las capas confinadas, las cuales suelen causar agrietamientos tipo "piel de cocodrilo".

Tanto el espesor como la rigidez de las capas afectan la distribución de las cargas y la resistencia a la fatiga de las capas del pavimento. Estas propiedades son generalmente consideradas en el proceso del diseño del pavimento, en la caracterización de los materiales.

La estabilidad de los materiales para resistir las deformaciones generalmente no se considera en forma directa en el diseño del pavimento porque la mayoría de los procedimientos de diseño asumen que las especificaciones de los materiales controlan adecuadamente este factor.

Muchos de los pavimentos actuales nunca fueron diseñados. Muchos de ellos fueron construidos utilizando espesores uniformes que fueron seleccionados con base en la experiencia.

Algunas agencias carreteras tienen catálogos o una lista con dos o tres tipos de diseño, a partir de la cual se seleccionan la composición del pavimento y el espesor de las capas. La Dirección General de Caminos utiliza el método ASSHTO 1993, para el diseño de pavimentos flexibles.

Evidentemente estos métodos no consideran todos los factores principales que afectan el comportamiento del pavimento, y por lo general, ocasionan la utilización ineficiente de los fondos públicos destinados a construcción, rehabilitación y mantenimiento de pavimentos.

La experiencia adquirida en el diseño de pavimentos pasados se pierde cuando el ingeniero encargado del diseño se va de la agencia. Asimismo, aún cuando se cuenta con la presencia de un ingeniero con experiencia, las experiencias del pasado pueden no ser aplicables a los programas actuales.

El aumento en los límites de carga en los caminos, la frecuencia de las cargas, la presión, el tipo de las llantas y el clima tienen un efecto combinado que causa circunstancias que los ingenieros con experiencia nunca habían tratado previamente.

Un procedimiento racional de diseño obliga al diseñador a considerar cada uno de los factores físicos que afectan el comportamiento. Este proceso conduce a realizar diseños mejores en relación con los diseños uniformes que no consideran la importancia de todas las variables de diseño.

Existen muchos procedimientos para diseñar pavimentos que las agencias locales pueden utilizar. En los Estados Unidos (EUA), algunos de los departamentos estatales de transporte publican sus procedimientos propios para uso de las agencias locales.

Todos los procedimientos de diseño deben considerar varios factores básicos que se sabe afectan el comportamiento de los pavimentos. Estos incluyen:

- La capacidad soporte por el suelo *in situ* (sub-rasante).
- Las cargas de tránsito esperadas (primordialmente de camiones y otros vehículos pesados), estas proviene del estudio de tránsito TPDA, proyectados.
- Factores ambientales (principalmente el impacto de los cambios en los niveles de humedad).
- El drenaje.
- Los materiales disponibles.
- La capacitación o habilidades de las fuerzas laborales de construcción.
- Costos.

1.3.2 Tratamientos de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción

Los trabajos de rehabilitación y reconstrucción son actividades costosas, igual que la construcción inicial de un pavimento.

Se necesita un análisis del pavimento existente para determinar las causas del deterioro y poder seleccionar el tratamiento económicamente más eficiente, que corrija el problema que creó la necesidad de reparación, en vez de tratar simplemente de remediar los síntomas del problema (en otras palabras, atacar el problema por sus causas y no sólo por sus efectos).

Esto puede ser planeado como una serie de pasos para determinar las causas del deterioro e identificar las restricciones relevantes. Las respuestas a un conjunto de preguntas pueden utilizarse para identificar los tratamientos factibles. Una evaluación a base de preguntas y respuestas a nivel de proyecto, debe incluir las siguientes preguntas⁵:

1. ¿Es el pavimento estructuralmente adecuado para el tránsito futuro?
2. ¿Es el pavimento funcionalmente adecuado?
3. ¿Es la tasa de deterioro anormal?
4. ¿Son los materiales del pavimento durables?
5. ¿Es el drenaje adecuado?
6. ¿Fueron inadecuados los trabajos previos de mantenimiento?
7. ¿Varía la condición sustancialmente a lo largo del tramo (sección) o entre los carriles?

⁵ Instituto Mexicano de Transporte, Aplicación del HDM-III al red carretera federal del estado de Puebla

8. ¿Requiere el medio ambiente de una consideración especial?
9. ¿Cuáles son las opciones disponibles para el control del tránsito?
10. ¿Cuáles son los factores geométricos que afectarán al diseño?
11. ¿Cuál es la condición de los acotamientos?

Las preguntas uno a seis esencialmente tratan la causa del deterioro. Muchas veces la respuesta a la pregunta uno puede ser contestada realizando un diseño de recapeo; si el análisis indica que no se necesita el recapeo, el pavimento puede ser considerado estructuralmente adecuado. La pregunta siete ayuda a determinar si se debe realizar un cambio en el tratamiento a lo largo de la sección analizada. Las preguntas ocho a once identifican las restricciones especiales que deben ser consideradas.

Una de las dificultades asociadas con este proceso es decidir cuáles y cuántos datos deben ser recolectados. Es difícil saber cuántos datos son necesarios hasta que algún otro tipo de información esté disponible. Se recomienda una serie de pasos para la recolección de datos a nivel de proyecto, incluyendo:

- Recolección de datos de oficina.
- Primer estudio de campo.
- Primera evaluación de datos y determinación de datos adicionales.
- Segundo estudio de campo.

- Realización de pruebas de laboratorio.
- Segunda evaluación de datos.
- Compilación final de datos de campo y de oficina.

Cada uno de estos pasos lleva a la determinación de los datos adicionales necesarios para el análisis. Si las necesidades de reparación fueron definidas desde un sistema de gestión a nivel de red, los datos de ese sistema deben servir como un punto de partida. El tamaño del tramo y su importancia para la agencia determina la cantidad de tiempo y los fondos que serán gastados en la evaluación a nivel de proyecto.

Los pavimentos de las carreteras principales con altos tránsitos como la red vial primaria de Guatemala, deben ser sujetos a una evaluación más completa y a un mayor número de pruebas que aquéllos que se encuentren en las vías de bajo tránsito.

Los conceptos y las preguntas indicadas anteriormente son válidos para cualquier carretera con cualquier volumen de tránsito; sólo la cantidad de las pruebas a realizar y el tiempo dedicado a obtener una conclusión, deben variar.

Existe un gran número de alternativas de trabajos de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción para ambos tipos de pavimentos, rígidos y flexibles; el reciclaje ha aumentado el número de opciones.

Los trabajos de sellado de superficie, como sellos con grava o con ligantes, en combinación con preparaciones localizadas son a menudo utilizadas como tratamientos de mantenimiento preventivo para pavimentos flexibles; también son utilizados como tratamiento de rehabilitación de pavimentos flexibles con volúmenes bajos de tránsito, cuando se requieren mejoras estructurales.

El recapeo con concreto asfáltico es el tipo más común de rehabilitación estructural que se aplica a ambos pavimentos. Sin embargo, muchos de los recapeos actualmente en sitio, nunca fueron diseñados.

Algunas agencias usan un espesor uniforme sin considerar la suficiencia estructural del pavimento. Los recapeos han llegado a ser más versátiles cuando se combinan con geotextiles y con reciclajes. Otros tipos de trabajos de rehabilitación y reconstrucción para pavimentos flexibles incluyen:

- Reciclaje en frío en sitio, seguido por la colocación de una nueva superficie.
- Reciclaje en caliente en sitio, seguido por un recapeo.
- Reconstrucción y estabilización de los materiales del cimientto.
- Extracción y reemplazamiento del pavimento.
- Reciclaje del pavimento en toda su profundidad.
- Recapeo de concreto de cemento Portland.

Los procedimientos para diseños nuevos son generalmente usados en el diseño de los trabajos de rehabilitación. Cuando las capas confinadas existentes de un pavimento se quitan y reemplazan o se trabajan completamente (como lo que se hace en el reciclado en frío en el lugar), los procedimientos para diseños nuevos pueden usarse, aplicando las propiedades adecuadas de los materiales, del material existente y del material a trabajar.

Cuando una parte de las capas confinadas existentes se deja en el lugar, un procedimiento de diseño de recapeo debe usarse para considerar el daño o deterioro que se ha desarrollado en el material confinado existente durante el tiempo que ha estado en servicio.

1.3.3 Selección de la mejor estrategia

Los procedimientos de análisis y diseño discutidos anteriormente definen una serie de alternativas. Es muy raro que exista una sola alternativa o un conjunto de materiales y espesores de las capas que sean inmediatamente obvio que representan la mejor solución. La durabilidad de los materiales y la efectividad económica de cada combinación se deben considerar.

Debido a la gran extensión de las áreas cubiertas por los pavimentos, éstos deben ser construidos con materiales baratos. Esto lleva a utilizar materiales localmente disponibles, algunos de los cuales pudieran necesitar mejoras a través de estabilizaciones químicas.

Las cargas de tránsito son difíciles de predecir. Asimismo, los materiales de los pavimentos, especialmente aquéllos en la capa superficial, están expuestos al medio ambiente.

Estos materiales están sujetos a cambios de humedad y temperatura. La resistencia o rigidez de los materiales usados cambian con la temperatura y las condiciones de humedad.

Algunos de los materiales también experimentan cambios a largo plazo debido a los efectos del medio ambiente y muchos tienen rigideces que cambian con los niveles de esfuerzo inducidos por las cargas.

El proceso a utilizar en la selección de la combinación de tratamientos, los materiales, los espesores para un nuevo diseño, el mantenimiento, la rehabilitación, o la reconstrucción, es un paso integral del diseño del proyecto.

El proceso debe incluir la realización de un diseño preliminar de espesores utilizando todos los materiales disponibles y tratamientos que son considerados factibles, dadas las circunstancias.

El diseñador debe tratar de identificar la combinación de tratamientos de materiales y espesores que dan el menor costo durante el período analizado, proporcionando al mismo tiempo la condición deseada.

Sin embargo, existen muchos factores que son difíciles de incluir en el análisis económico que pueden tener un impacto directo en el tipo de pavimento seleccionado.

Los pavimentos rígidos que fueron diseñados y construidos en forma apropiada, generalmente duran más hasta el momento de la primera rehabilitación que los pavimentos flexibles que fueron adecuadamente diseñados y construidos.

Los pavimentos de concreto de cemento Portland tienen generalmente un costo inicial muy alto, pero los pavimentos de concreto asfáltico necesitan rehabilitaciones más frecuentes. En muchos casos, la diferencia de costos entre estas alternativas, cuando se considera un período de análisis a largo plazo, será pequeña.

Los pavimentos se pueden mantener en servicio más allá de la vida útil original de diseño cuando se aplican tratamientos de mantenimiento y deben ser considerados en el diseño de un nuevo pavimento y de una rehabilitación.

Para el diseño de una nueva construcción o rehabilitación, deben analizarse estrategias en vez de considerar tratamientos individuales. Las estrategias generalmente consisten en una secuencia de tratamientos; por ejemplo, para un diseño nuevo dos estrategias podrían ser las siguientes:

1. Construir una superficie concreto asfáltico, seguida por un recapeo a los 15 años, un recubrimiento asfáltico de gravilla a los 22 años y una reconstrucción y un recapeo a los 30 años.
2. Construir una superficie de concreto de cemento Portland, realizando un resellado de las juntas a los ocho años y a los 16 años, seguido por una restauración del pavimento a los 24 años y un recapeo de concreto asfáltico a los 30 años.

Los conceptos referentes a determinar el costo total actualizado de los pavimentos durante su vida útil deben utilizarse para determinar la diferencia de costo de las distintas estrategias.

Los costos deben incluir aquéllos necesarios para el control del tránsito y los relacionados con el impacto de las operaciones de mantenimiento y rehabilitación en los usuarios. Para cada sección seleccionada a nivel de red, debe determinarse la estrategia de menor costo total actualizado, considerando los conceptos antes indicados.

1.4 Relación entre los elementos a nivel de red y nivel de proyecto

Los elementos a nivel de red en un sistema de gestión deben identificar y priorizar las secciones que necesitan trabajo en cada uno de los años del período de análisis, deben identificar las necesidades financieras y mostrar el impacto de las diferentes estrategias de financiamiento.

Las agencias de transporte deben evitar durante el análisis a nivel de red, así como dar a conocer la relación existente entre el financiamiento y las secciones específicas de pavimento en que se actuará, para así evitar restricciones de financiamiento innecesarias en la parte temprana del análisis a nivel de proyecto. La lista priorizada de secciones en que debe actuarse cada año es el punto de partida del análisis a nivel de proyecto.

Para las secciones en que deba actuarse en un año determinado, a nivel de proyecto deben recolectarse datos adicionales, determinarse la causa de los deterioros e identificarse los tratamientos factibles.

El análisis a este nivel debe determinar estimados de costos más exactos para cada alternativa y seleccionar la solución más eficiente económicamente dada las restricciones impuestas. En este momento, se debe de determinar el costo de reparar cada sección.

1.5 Importancia de los sistemas de gestión de pavimentos

Por muchos años, las agencias o departamentos de transporte de los distintos países del mundo han utilizado diversos métodos para administrar los fondos disponibles.

Las construcciones de las carreteras nuevas son las que mejor fueron administradas por grupos de planeación en las agencias de mayor tamaño, para decidir cuáles y dónde serían construidas.

Los trabajos de mantenimiento y rehabilitación generalmente fueron administrados con métodos menos formales, para el mantenimiento del año posterior se consideran las cantidades de trabajo propuestas por el encargado del mantenimiento del proyecto en ese período, como es el caso de COVIAL en estos tiempos.

En muchos casos, especialmente en las agencias de menor tamaño, el criterio de administración fue de atender las secciones carreteras más deterioradas, generalmente con recursos insuficientes para la adecuada reparación de todas ellas; a este sistema generalmente se le ha conocido como de emergencia o de reacción ante situaciones de crisis.

En los últimos 20 a 30 años, los SGP han sido desarrollados en el mundo para ayudar en la planeación del mantenimiento y rehabilitación. Los SGP son necesarios para evitar respuestas de crisis en los departamentos de obras públicas.

Estas metodologías se basan en la aplicación de la teoría de sistemas y de conceptos básicos de administración para la gestión de la infraestructura; proporcionan una manera estructurada y documentada para obtener el máximo rendimiento del dinero disponible para mejorar la infraestructura.

1.6 Beneficios de la Administración de Pavimentos

Existen diversos beneficios derivados de tener un proceso estructurado de administración de los pavimentos, los cuales son muy obvios; sin embargo, pocos beneficios monetarios han sido documentados. Los beneficios que han sido identificados incluyen:

- Uso más eficiente de los recursos disponibles.
- Una mayor habilidad para justificar y asegurar un mayor financiamiento para las actividades de mantenimiento y rehabilitación de pavimentos.
- Información más exacta y accesible sobre el estado de un sistema de vialidades.
- Habilidad de evaluar el comportamiento de los tratamientos seleccionados.
- Determinación de necesidades que pueden ser apoyadas.
- Habilidad de mostrar el impacto de distintas estrategias de financiamiento.

- Selección de estrategias más efectivas de mantenimiento y rehabilitación.
- Mejoras de comunicación entre los distintos grupos que trabajan con los pavimentos dentro de la organización y con el público.
- Habilidad de responder preguntas sobre los pavimentos hechas por administradores, políticos y por el público.
- Mejor coordinación de los trabajos con las agencias de servicio público.
- Mayor credibilidad con los políticos y el público, en lo relacionado con la administración.
- El desarrollo de un sentimiento de satisfacción a partir del convencimiento que la agencia está realizando el mejor trabajo con el financiamiento disponible.

2. MODELOS DE DETERIORO DE PAVIMENTOS

2.1 Generalidades

El presente estudio tiene como objetivo, presentar el marco teórico de los sistemas de gestión de pavimentos existentes, así como la descripción de las herramientas de apoyo a la gestión que tienen como objetivo principal, aumentar el poder de análisis de los organismos encargados de realizar una gestión de infraestructura vial.

Durante el desarrollo de los siguientes capítulos se presentaran los conceptos básicos de los sistemas HDM-III y HDM-4 que sirven como una poderosa herramienta para la gestión de pavimentos, la calibración de los modelos de comportamiento de pavimentos y finalmente realizar la evaluación económica.

2.2 Gestión del mantenimiento de los pavimentos

Los pavimentos son diseñados para un tiempo de vida determinado, para que el pavimento entregue el servicio esperado deben realizarse actividades de conservación adecuadas, esta situación incentiva la creación de los sistemas de gestión de pavimentos SGP, los cuales analizamos en detalle en el capítulo 1.

Un SGP se define como “el conjunto de operaciones que tienen como objetivo conservar por un período de tiempo las condiciones de seguridad, comodidad y capacidad estructural adecuadas para la circulación, soportando las condiciones climáticas y de entorno de la zona en que se ubica la vía en

cuestión. Todo lo anterior minimizando los costos monetarios, sociales y ecológicos⁶.

2.3 Modelos de deterioro de los pavimentos

Los modelos de deterioro son por lo general, expresiones matemáticas que representan la evolución del estado del pavimento en el tiempo, con base al conocimiento de sus condiciones en el momento de la puesta en servicio y de realización del análisis.

Los modelos de deterioro pronostican el efecto de las actividades de mantenimiento en función del tiempo, con el objetivo de estimar con mayor precisión el momento de aplicación de actividades de conservación y conocer el nivel de deterioro resultante después de la misma y su progresión en el tiempo.

Los modelos de deterioro de pavimentos aplican a diversos aspectos de la gestión de pavimentos como:

- En la creación de un SGP que se sirva de los modelos para: predecir el deterioro del pavimento en el tiempo, evaluar los resultados de aplicar diversas alternativas de mantenimiento, hacer el plan de conservación del pavimento y optimizar los resultados del nivel de servicio del pavimento como de los costos asociados para lograrlo.
- En la generación de estándares y políticas de mantenimiento del nivel de servicio requerido del pavimento.

⁶ Solminihaç, 1998

- En la evaluación del efecto relativo de algunas características de diseño.
- En el país existe la necesidad de crear sistemas formales de gestión de pavimentos aplicables a nuestras redes viales, esto crea a su vez la necesidad de contar con modelos de deterioros confiables, bien cuantificados y adecuadamente validados.

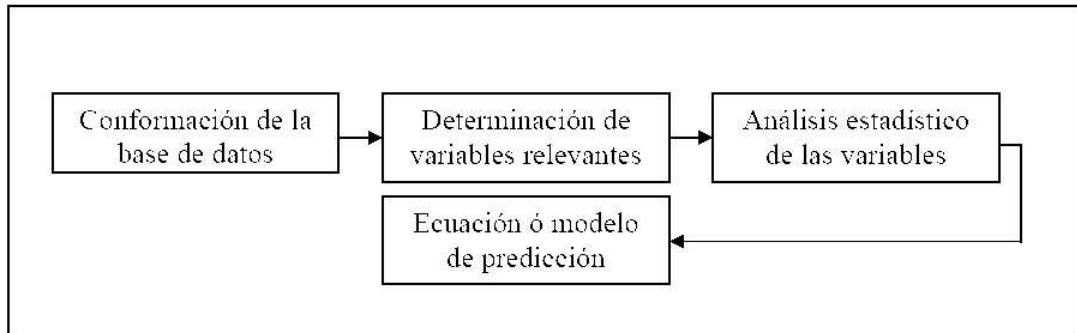
Los modelos de deterioro pueden surgir a partir de desarrollos empíricos y/o mecanicistas, la diferencia entre éstos es el tipo de datos a utilizar.

Para los desarrollos empíricos se requieren datos reales de los pavimentos existentes referidos a diversos aspectos del pavimento como: datos de diseño, datos del drenaje, datos de tránsito, datos de medio ambiente y deterioros sufridos a lo largo de su vida útil, mientras que para los desarrollos mecanicistas, además de los datos del pavimento, las características del comportamiento de las capas que conforman la estructura del pavimento, específicamente sus propiedades físicas y mecánicas.

Después de determinar las variables más relevantes en la formación de cada deterioro, se lleva a cabo con ellas un análisis estadístico que dará origen al modelo de predicción del comportamiento futuro del pavimento con base a una ecuación que relaciona las variables seleccionadas.

En la figura 3 observamos un diagrama de flujo que indica el desarrollo de los modelos de deterioro.

Figura 3. Procedimiento para la creación de un modelo de deterioro



Fuente: Dra. Elva Bengoa Pérez, Descripción de Sistemas de Gestión de Pavimentos y uso de los, Programas HDM-III y HDM-4 Pág. 10.

2.4 Técnicas para el desarrollo de los modelos

Existen muchas técnicas para el desarrollo de modelos de deterioro, las más utilizadas son:

- extrapolación lineal
- regresión
- distribución de probabilidad

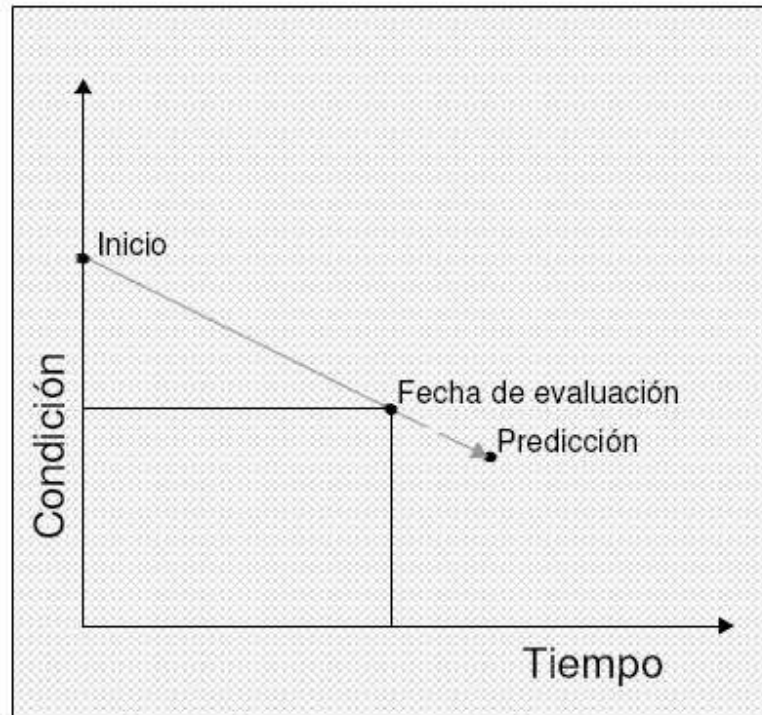
La precisión de los modelos es un punto de gran importancia dependerá del uso que se desee dar a los resultados.

2.4.1 Extrapolación lineal

Este método se basa en la extrapolación lineal de los dos últimos puntos de la condición del pavimento, sus principales características son:

- Es aplicable sólo a secciones individuales de pavimentos y no puede usarse en otras secciones.
- Se requiere al menos una medición de la condición del pavimento además de la realizada al final de la etapa de construcción (Figura 4).
- Asume que las cargas de tránsito, los niveles de mantenimientos y tasas de deterioro se mantendrán en el futuro, por lo tanto, no es preciso para períodos largos de tiempo.
- En el caso de aplicar este tipo de modelos en nuestro país, es este punto especialmente importante dada la variabilidad principalmente de las cargas y actividades de mantenimiento.
- No es aplicable predecir tasas de deterioros de pavimentos recién construidos que hayan sufrido recientemente una rehabilitación mayor.
- Para una sección de pavimento específica, los factores de suelo de cimentación, clima, estructura de pavimentos y tránsito pasado se consideran explícitamente en el análisis.

Figura 4 Extrapolación lineal



Fuente: Dra. Elva Bengoa Pérez, Descripción de Sistemas de Gestión de Pavimentos y uso de los, Programas HDM-III y HDM-4 Pág. 11.

2.4.2 Regresión

El análisis de regresión es usado para establecer una relación empírica entre dos o más variables. Cada variable es descrita en términos de media y su variación. Los distintos tipos de variación se describen a continuación.

Regresión lineal entre dos variables, se describe con el modelo siguiente:

$$- y_i = a + b x_i + \text{error}$$

Regresión lineal múltiple, en este caso se asume que la variable dependiente es una función lineal de las variables independientes y se describe:

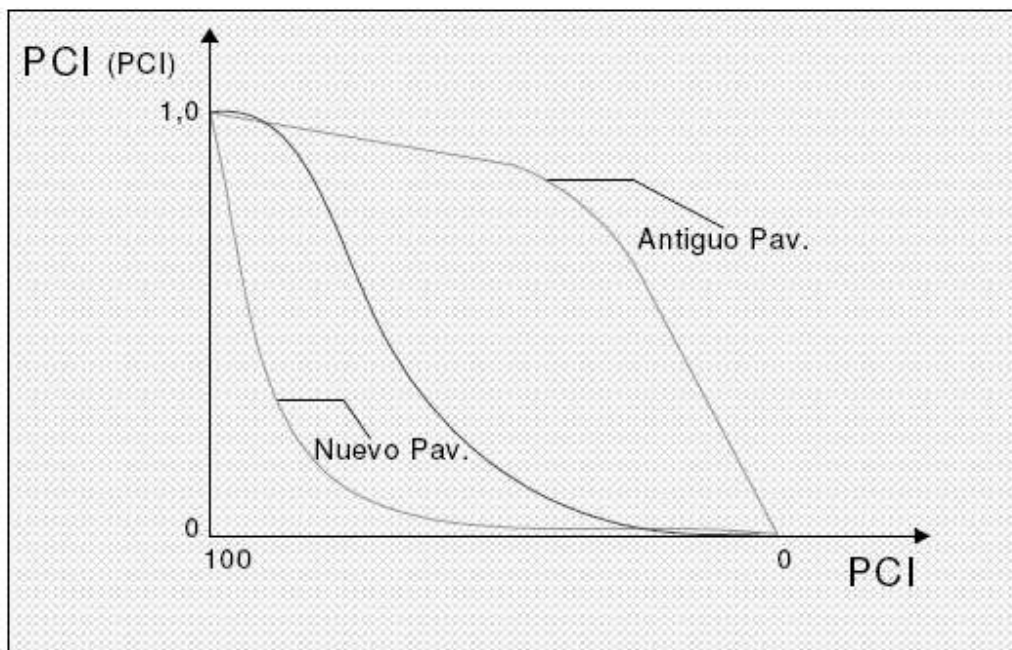
$$- y = a + b_1.x_1 + b_2.x_2 + \dots + \text{error}$$

Regresión no lineal, se puede utilizar cuando la relación entre la variable dependiente y la independiente es no lineal. Una relación no lineal puede ser analizada como un modelo lineal transformando la variable dependiente.

2.4.3 Distribución de probabilidad

La condición de un pavimento, como el IRI, puede ser tratada como una variable aleatoria con una probabilidad asociada a sus valores. Una distribución de probabilidades describe la probabilidad asociada con todos los valores de la variable aleatoria. Ejemplo, si la variable aleatoria IRI, entonces, la distribución puede ser descrita como la función de distribución acumulada de la Figura 5.

Figura 5 Distribución de probabilidades



Fuente: Dra. Elva Bengoa Pérez, Descripción de Sistemas de Gestión de Pavimentos y uso de los, Programas HDM-III y HDM-4 Pág. 12.

En la figura anterior, el eje vertical es la probabilidad de que el IRI sea igual o menor que un determinado valor de IRI. Esta figura presenta además distribuciones acumuladas en diferentes puntos de la vida del Pavimento y podría representar la probabilidad en el tiempo de un determinado valor de IRI.

2.4.4 Modelo de deterioro de pavimentos asfálticos (HDM)

Para el desarrollo de los modelos de HDM se adoptó un sistema que combina métodos empíricos avanzados. La metodología utilizada fue fundamentalmente empírica, de manera que se desarrollaron modelos para métricos utilizando técnicas de regresión estadística de la información proveniente de series de tiempo: información que había sido coleccionada en una base de datos factorial mente diseñada, a partir de pavimentos en servicio bajo diferentes condiciones de estructura y tránsito⁷.

Por otra parte, la forma funcional y los parámetros de los modelos se basaron en teorías mecanicistas y en el conocimiento experimental del comportamiento estructural de los pavimentos y de los materiales que lo conforman.

La forma del modelo HDM es incremental, es decir que predice el cambio en la condición del pavimento a lo largo de un cierto incremento de tiempo como función de la condición actual del pavimento, de sus características estructurales y de las solicitaciones externas (tránsito y condiciones climáticas).

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

⁷ Paterson, 1987

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

2.5 Calibración de los modelos de deterioro

Calibrar un modelo de deterioro consiste en definir un procedimiento de cálculo de factores de calibración numéricos, que modifican la predicción del modelo ajustándolo de acuerdo a la información provista por bases de datos de pavimentos de una región o país.

Esto se realiza a través de la minimización de la diferencia entre las predicciones del modelo y un conjunto de datos de deterioro medidos en terreno.

El objetivo de la calibración es obtener modelos de predicción ajustados, que ofrezcan estimaciones más realistas y confiables de los deterioros y que

permitan establecer planes de conservación que tiendan a optimizar los recursos disponibles y minimizar el costo total de operación del camino (costo total = costo de operación vehicular + costo de conservación + costo exógeno).

La calibración de los modelos de deterioro puede realizarse a dos niveles: es decir calibración a nivel de proyecto y calibración a nivel de red respectivamente. (ver capítulo 1).

Ya que los modelos de deterioro son desarrollados con una base empírica determinada y bajo condiciones específicas de clima, tipo y forma, materiales, etc., al ser estos utilizados bajo condiciones distintas, pueden presentarse diferencias considerables entre los deterioros que el modelo predice y los que se observan en la realidad, para reducir estos errores ó para verificar si el modelo es inadecuado o incompleto, detectando posibles debilidades y limitaciones, los procedimientos de calibración o ajuste resultan muy útiles. Las causas de las diferencias son las siguientes:

- Errores en los datos observados: debido a inadecuadas técnicas de medición, mal registro de los datos ó toma datos que no correspondan.
- Errores en los datos estimados: en aquellos datos sobre los cuales no se disponga toda la información necesaria y deben ser estimados, el error en la estimación muy probablemente ocasiona error en la predicción.
- Condiciones diferentes a las originales del modelo: si el modelo se aplica fuera de su espacio de inferencia original.
- Modelo Inadecuado: si el modelo no contiene algunas variables que son claramente importantes, ya sea porque no resultaron estadísticamente

significativas con los datos originales o porque un proceso de análisis poco profundo o incompleto no las tuvo en cuenta, esto puede ocasionar una mala predicción.

- Aleatoriedad del comportamiento de los materiales y las estructuras: siempre existe un cierto margen de error introducido por un comportamiento aleatorio o estocástico de los materiales que componen las estructuras en el mundo real que genera dispersión en los resultados.

3. VISIÓN GENERAL DEL HDM

3.1 Antecedentes del HDM

El modelo de estándares de conservación y diseño de carreteras *Highway Design and Maintenance Standards Model* (HDM), desarrollado por el Banco Mundial, es un *Software* que se viene usando desde los años 90's, para combinar la evaluación técnica y económica de proyectos, preparar programas de inversión y analizar estrategias de redes de carreteras.

El estudio internacional del desarrollo y gestión de carreteras ha sido realizado para armonizar los sistemas de gestión de carreteras, con herramientas de *Software* adaptable y fácil de usar. Esto ha dado como resultado la herramienta de desarrollo y gestión de carreteras *Highway Design and Maintenance Standards Model* en sus dos versiones (HDM-III) y (HDM-4)) esta última siendo la más reciente.

El ámbito de HDM se ha ampliado considerablemente, superando las evaluaciones tradicionales de los proyectos, para proporcionar un potente sistema para el análisis de la gestión de carreteras y de las alternativas de inversión.

Este capítulo de visión general contiene un resumen breve de la descripción del sistema HDM. Todos los lectores nuevos de HDM, en particular los profesionales dedicados al desarrollo de la ingeniería de tránsito, directivos de alto nivel de una organización de carreteras, y personas interesadas en el tema, encontraran en este informe una introducción general al modelo de evaluación y sus posibles aplicaciones en la planificación de proyectos.

3.1.1 Desarrollos pasados del HDM

El primer paso para producir un modelo de evaluación técnica y económica de la viabilidad de proyectos de carreteras lo dio en 1968 el Banco Mundial. El primer modelo se produjo como respuesta a los términos de referencia para un estudio de diseño de carreteras producido por el Banco Mundial, conjuntamente con el *Transport and Road Research Laboratory (TRRL)* y el *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)*. Posteriormente, el Banco Mundial encargó al *Massachusetts Institute of Technology (MIT)* la realización de un estudio de la bibliografía existente y la construcción de un modelo basado en la información disponible.

Para determinar los costes de las obras y costes de operación de vehículos el Banco Mundial en 1970, llevó a cabo un importante estudio de campo en Kenya para investigar el deterioro de carreteras pavimentadas y no pavimentadas, así como los factores que afectan a los costes de operación de vehículos en un país en desarrollo.

Los resultados de este estudio fueron utilizados por TRRL para producir la primera versión prototipo del Modelo de Inversión en Transporte por Carretera (*Road Transport Investment Model (RTIM)*) para países en desarrollo.

En 1976, el Banco Mundial financió nuevos desarrollos en el (MIT), que produjo la primera versión del Modelo de estándares de diseño y conservación de carreteras (*Highway Design and Maintenance Standards model (HDM-I)*).

Otros trabajos adicionales fueron realizados en diversos países para ampliar el ámbito geográfico de los modelos HDM, entre ellos se mencionan algunos como:

- El Estudio Caribe: Investigaba los efectos de la geometría de carreteras en los costes de operación de vehículos.
- Estudio India: por el (*Central Road Research Institute - CRR*) Estudiaba problemas operativos particulares de las carreteras de la India, en términos de estructuras de pavimento estrechas y grandes proporciones de transporte no motorizado.
- Estudio Brasil: (financiado por UNDP) Ampliaba la validez de todas las relaciones entre modelos. Los resultados de los estudios TRRL se usaron para desarrollar el modelo RTIM2, mientras que el Banco Mundial desarrolló un modelo más completo que incorporaba lo averiguado en todos los estudios anteriores y esto condujo a HDM-III.

3.1.2 Objetivos del desarrollo de HDM

Se han utilizado ampliamente distintas versiones de los modelos en diversos países que han sido usados fundamentales para justificar los cada vez mayores presupuestos de conservación y rehabilitación de carreteras.

Los modelos se utilizaron para investigar la viabilidad económica de proyectos en más de 100 países y para optimizar los beneficios económicos de usuarios de carreteras bajo diferentes niveles de gastos. Como tal, proporcionan avanzadas herramientas de análisis de inversiones en carreteras, con unas posibilidades de aplicación muy amplias en diversos climas y condiciones.

Aunque muchas aplicaciones de los distintos modelos se habían utilizado en países en desarrollo, en los últimos años muchos países industrializados comenzaron a utilizar el modelo HDM.

Esto hacía que fuese necesario incluir funciones adicionales, por ejemplo, modelos para: efectos de la congestión de tráfico, efectos de climas fríos, una gama más amplia de estructuras de pavimentos, seguridad vial, efectos medioambientales (consumo de energía, ruido del tráfico y emisiones de vehículos).

El marco de estos antecedentes sirvió de referencia para el desarrollo de HDM-III y posteriormente el HDM-4 que se diseñó esencialmente para incorporar la gama de pavimentos rígidos.

3.2 El papel del HDM en la gestión de carreteras

3.2.1 Gestión de carreteras

Al considerar las aplicaciones de HDM es necesario contemplar y entender el proceso de gestión de carreteras, en cuanto a las siguientes funciones: Planificación, Programación, Preparación, y Operaciones.

3.2.1.1 Planificación

La planificación comprende el análisis del sistema de carreteras en su conjunto y, típicamente requiere la preparación de presupuestos a medio y largo plazo, con estimaciones de gastos, desarrollo y conservación de carreteras bajo diferentes presupuestos económicos.

Se pueden hacer previsiones de las condiciones de redes de carreteras bajo diversos niveles de financiación en términos de indicadores clave, junto con previsiones de los gastos necesarios bajo partidas presupuestarias definidas.

En la etapa de planificación, el sistema físico de carreteras normalmente incluye la siguiente información, agrupadas en varias categorías y definidas por parámetros como:

- Clase o jerarquía de la carretera
- Flujo/cargas/congestión de tráfico
- Tipos de pavimentos
- Estado del pavimento
- Longitud de la carretera en cada categoría
- Características del parque de vehículos que utiliza la red.

Los resultados del ejercicio de planificación son del máximo interés para quienes definen las políticas del sector, tanto en el ámbito político como en el profesional. Este trabajo lo suele realizar una unidad de planificación.

3.2.1.2 Programación

La programación comprende la preparación bajo restricciones presupuestarias, programas de gastos y de obras para varios años, en los que se seleccionan y analizan tramos de la red que necesitarán conservación, mejora o nueva construcción.

La programación es un ejercicio de planificación táctica. Idealmente, debería realizarse un análisis de costes-beneficios, para determinar la viabilidad económica de cada conjunto de las obras.

En la fase de programación, la red de carreteras física se considera itinerario a itinerario, con cada uno de ellos caracterizado por tramos de firme homogéneos definida en términos de atributos físicos.

Los presupuestos suelen estar limitados, y uno de los aspectos clave de la programación es asignar prioridades a las obras para utilizar de forma óptima el presupuesto limitado.

Las aplicaciones más típicas son la preparación de un presupuesto para un programa de obras anual o plurianual en una red o subred de carreteras.

Los profesionales de nivel directivo de una organización de carreteras son los que normalmente suelen realizar las actividades de programación, quizás con un departamento de planificación.

3.2.1.3 Preparación

Ésta es la fase de planificación a corto plazo, donde los planes de carreteras aprobados se agrupan para realizarlos. En esta fase, se refinan los diseños y se preparan con más detalle; se hacen listas de cantidades de trabajo y costes detallados, junto con instrucciones para las obras y contratos.

Es probable que se realicen las especificaciones, costos unitarios y también se puede realizar el análisis detallado de costes-beneficios para confirmar la viabilidad del esquema final. Las obras sobre tramos de carreteras adyacentes se pueden combinar en paquetes de un tamaño que sea rentable para ejecución la cual dependerá de la importancia, tamaño y especificaciones del proyecto.

Por ejemplo, construcción de un nuevo trazado o cambio de línea, ampliación de la sección transversal de la carretera, reconstrucción del pavimento, etc. Para estas actividades normalmente ya estarán aprobados los presupuestos.

Las actividades de preparación las suelen realizar profesionales y técnicos de nivel medio de un departamento de diseño o implantación de una organización de carreteras y por el personal de contratación y compras.

3.2.1.4 Operación

Estas actividades cubren la operación diaria de una organización. Las decisiones sobre la gestión de operaciones se suelen tomar de forma diaria o semanal, incluyendo la programación de las obras a realizar, la supervisión en términos de mano de obra, equipos y materiales, el registro de las obras finalizadas y el uso de esta información para supervisión y control.

Las actividades se centran normalmente en tramos o sub-tramos individuales de una carretera, haciéndose frecuentemente las mediciones con un nivel bastante detallado.

Las operaciones las suelen dirigir profesionales y sub-profesional, como ingenieros supervisores, técnicos, encargados y otros.

A medida que el proceso de gestión pasa de la Planificación a Operaciones, se verá que se producen cambios en los datos necesarios.

3.2.2 El ciclo de gestión

Tradicionalmente, en muchas organizaciones de carreteras, los presupuestos y programas de las obras se han preparado, según una base histórica, donde el presupuesto de cada año se basa en el del año anterior, con un ajuste para la inflación.

Bajo un régimen semejante, no hay forma de saber si los niveles de financiación o la asignación detallada de recursos son adecuados o justos, por lo que existe claramente la necesidad de un enfoque objetivo, basado en las necesidades reales, que use el conocimiento del contenido, estructura y estado de las carreteras que se están gestionando.

Se verá que las funciones de planificación, programación, preparación y operaciones proporcionan un marco adecuado en el que pueda aplicarse un enfoque basado en las necesidades existentes en los tramos carreteros gestionados.

Para llevar a cabo cada una de estas cuatro funciones de gestión, se recomienda un análisis integrado del sistema. Un enfoque adecuado es usar el concepto de ciclo de gestión que se ilustra en la Figura 6.

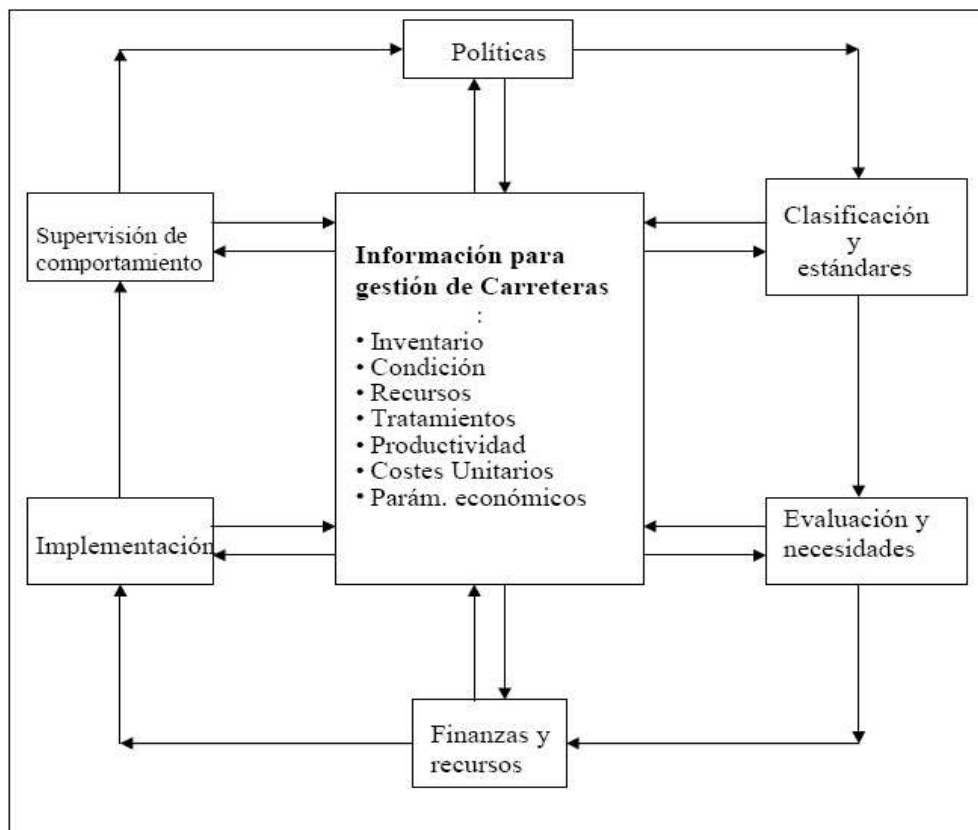
El ciclo proporciona una serie de pasos bien definidos que ayudan a tomar las decisiones del proceso de gestión.

El ciclo de gestión se realiza típicamente una vez al año o en un período presupuestario, y que por lo general en Guatemala se preparan cada año.

3.2.3 Funciones de la gestión

El proceso de gestión de carreteras en su conjunto puede, por lo tanto, considerarse como un ciclo de actividades que se realizan dentro de cada una de las funciones de gestión: planificación, programación, preparación y operación. La Figura 7 describe este concepto y proporciona el marco en el que HDM satisface las necesidades de una organización de gestión de carreteras.

Figura 6. Ciclo de gestión de carreteras



Fuente: Manual del HDM-IV, Volumen 1, Pág. 10

Figura 7. Funciones de gestión y las aplicaciones del HDM

Función de gestión	Descripciones de tareas comunes	Aplicaciones del HDM
Planificación	Sistemas de análisis de estrategias	Análisis de estrategias
	Sistema de planificación de la red	
	Sistemas de gestión del pavimento	
Programación	Sistemas de análisis de proyectos	Análisis del programa
	Sistemas de gestión del pavimento	
	Sistema presupuestario	
Preparación	Sistemas de análisis del proyecto	Análisis del proyecto
	Sistemas de gestión del pavimento	
	Sistema de gestión de puentes	
	Sistema de diseño del pavimento	
	Sistema de contratación	
Operación	Sistemas de gestión del proyecto	No cubierto por HDM
	Sistema de gestión de la conservación	
	Sistemas de gestión de equipos	
	Sistema de gestión financiera	

Fuente: Manual del HDM-IV, Volumen 1, Pág. 11

3.3 Aplicaciones del HDM

3.3.1 Análisis de estrategias

El concepto de la planificación estratégica de gastos en redes de carreteras a mediano y largo plazo exige que la organización de carreteras tenga en cuenta las necesidades de toda su red de carreteras.

De esa forma, el análisis estratégico abarcará redes completas o subredes gestionadas por una única organización. Ejemplos de redes de carreteras pavimentadas en Guatemala son las siguientes:

- **Red vial primaria:** tiene como propósito el facilitar y fortalecer la comunicación directa a nivel macro regional, entre las regiones, políticas continuas establecidas, según Decreto 70-86 (ley preliminar de regionalización) e internacional al comunicar de y hacia los principales puertos marítimos y puertos fronterizos con los países vecinos, constituyendo la red básica de carreteras troncales o colaterales. Actualmente, la red vial primaria está conformada por las rutas centroamericanas (CA), tramos específicos de rutas nacionales (RN) y rutas departamentales (RD), así como la franja transversal del norte (FTN).
- **Red vial secundaria:** su objetivo es completar la red vial primaria, facilitando la comunicación regional, así como proveer de una comunicación directa en lo posible entre las cabeceras de departamentos contiguos, orientadas a comunicar hacia y desde los mayores centros de población y/o producción conformado una red complementaria y/o alterna a la red vial primaria.

La constituyen la ruta CA-9 sur "a", en sus tramos: Palín-Escuintla y Escuintla-Puerto San José, rutas nacionales y rutas departamentales.

- **Red vial complementaria:** su propósito es el completar la red vial primaria y secundaria, proporcionando comunicación en la medida de lo posible entre cabeceras departamentales y sus respectivos municipios y aldeas. La misma está orientada a permitir el ingreso y egreso de insumos y servicios desde y hacia los centros de consumo y producción.

Para predecir las necesidades a medio y largo plazo de toda una red o subred de carreteras, HDM aplica el concepto de una matriz de red de carreteras que comprende las categorías de la red definidas en función de los atributos clave que más influyen en el comportamiento del firme y en los costes de los usuarios.

Aunque es posible crear modelos de tramos parciales de carreteras, en la aplicación del análisis estratégico, teniendo en cuenta que la mayoría de las administraciones suelen ser responsables de varios miles de kilómetros, resulta muy laborioso modelar individualmente cada segmento de carretera.

Los usuarios de HDM pueden definir la matriz de la red de carreteras de forma que represente los factores más importantes que afectan a los costes de transporte en el país. Una matriz típica de red de carreteras se podría clasificar en función de lo siguiente:

- Volumen de tráfico o carga.
- Tipos de rodadura.
- Estado de la rodadura.
- Zonas medioambientales o climáticas.
- Clasificación funcional (si es necesaria).

Por ejemplo, una matriz de red de carreteras podría modelarse usando: tres clases de tráfico (alto, medio, bajo), dos tipos de rodadura (mezcla bituminosa, tratamientos superficiales) y tres niveles de estado del firme (bueno, regular, malo).

En este caso, se asume que el entorno en toda el área de estudio es similar y que la administración de la carretera es responsable de una clase de carretera, por ejemplo, la red vial primaria.

La matriz de red de carreteras resultante, en este caso, comprendería por lo tanto ($3 \times 2 \times 3 =$) 18 tramos de rodadura representativos. No existe límite al número de tramos de rodadura representativos que se puede usar en un análisis estratégico.

La alternativa está normalmente entre una simple matriz representativa de la red de carreteras, que daría unos resultados muy bastos, y una matriz de red de carreteras detallada, con varios tramos representativos, cuyos resultados serían potencialmente más exactos.

El análisis estratégico se puede usar para analizar una determinada red en su conjunto y preparar estimaciones para planificación de necesidades de gasto para desarrollo y conservación de carreteras a medio y largo plazo, bajo diferentes supuestos presupuestarios.

Entre las aplicaciones típicas del análisis estratégico para las administraciones de carreteras citaremos:

- Previsiones a medio y largo plazo de necesidades de financiación para cumplir con unos estándares de conservación establecidos en una red de carreteras específicos.
- Previsiones de comportamiento a largo plazo de redes de carreteras con diferentes niveles de financiación.
- Asignación óptima de fondos, según partidas presupuestarias definidas; por ejemplo, conservación rutinaria, conservación periódica y presupuestos de desarrollo (capital).
- Asignaciones óptimas de fondos a subredes; por ejemplo, por tipo funcional de carretera (primarias, secundarias y complementarias, etc.) o por región administrativa o departamental.
- Los estudios de políticas como el impacto de los cambios en el límite de carga por eje, estándares de conservación del pavimento, análisis de equilibrio energético, provisión de instalaciones para el tráfico no motorizado, tamaño sostenible de la red de carreteras, evaluación de estándares de diseño de pavimentos, etc.

3.3.2 Análisis del programa

Trata principalmente sobre la asignación de prioridades a una larga lista definida de proyectos de carreteras candidatos para un programa de obras de uno o más años bajo restricciones presupuestarias definidas.

Es esencial tener en cuenta que aquí tratamos con una larga lista de proyectos candidatos, seleccionados como segmentos discretos de una red.

Los criterios de selección dependerán normalmente de los estándares de conservación, mejora o desarrollo que pueda haber definido la agencia de carreteras (por ejemplo, a partir de los resultados de la aplicación del análisis de estrategias). Como ejemplos de criterios de selección que se pueden usar para identificar proyectos candidato incluiremos:

- Umbrales de conservación periódica (por ejemplo, resellado de la superficie del firme, o sello de grietas cuando el daño es del 20%).
- Umbrales de mejora (por ejemplo, ampliar el ancho de las carreteras a una relación volumen/capacidad superior al 0,8).
- Estándares de desarrollo (por ejemplo, mejorar las carreteras de grava a un doble tratamiento superficial DTS si la media anual de tráfico diario (TPD) excede de 200 vehículos por día).

Una vez identificados todos los proyectos candidatos, la aplicación de análisis de programa HDM, se puede usar para comparar los costes del ciclo de vida previstos bajo el régimen existente de conservación del pavimento (es decir, el caso sin proyecto) frente a los costes del ciclo de vida previstos para las alternativas de conservación periódica, mejora de carreteras o desarrollo (es decir, caso con proyecto).

Esto proporciona la base para estimar los beneficios económicos que se derivarían de incluir en todos los proyectos candidatos en el marco de tiempo del presupuesto.

Hay que tener en cuenta que la diferencia entre análisis de estrategias y análisis de programa es la forma en que los itinerarios y tramos de carreteras se identifican físicamente.

El análisis del programa trata de itinerarios y tramos individuales que son unidades físicas únicas identificables en la red, de carreteras mediante el análisis.

En el análisis de estrategias, el sistema de carreteras básicamente pierde sus características individuales de enlaces y tramos, agrupándose todos los segmentos de similares características en las categorías de la matriz de la red de carreteras.

Tanto para el análisis de estrategias como para el de programa, el problema se puede plantear como la búsqueda de aquella combinación de alternativas de tratamiento en varios tramos de la red, que optimiza una función objetivo bajo una restricción presupuestaria.

Si, por ejemplo, la función objetivo es maximizar el valor neto actual (VAN), el problema se puede definir como: seleccionar aquella combinación de opciones de tratamiento de tramos que maximiza el VAN para toda la red, sujeta a que la suma de costes de tratamiento sea inferior al presupuesto disponible.

La aplicación de análisis de programa de HDM se puede usar para preparar un programa para varios años, sujeto a recursos limitados (ver Figura 8).

El método de asignación de prioridades utiliza la relación VAN incremental/coste como índice de valoración. Esto proporciona un índice eficiente y robusto para propósitos de priorización.

Índices como el valor actual neto VAN, tasa interna de retorno TIR o características previstas del estado del pavimento (por ejemplo, índice de rugosidad de la carretera) no se recomiendan como criterios de valoración.

La relación Beneficio/Costo satisface el objetivo de maximizar los beneficios económicos para cada unidad de gasto adicional (es decir, maximizar los beneficios netos para cada Q. 1.00 de presupuesto disponible invertido).

Figura 8 Salida de ejemplo del análisis del programa HDM

Ranking prioridad	Tramo Carretera	Longitud Provincia		Tipo de obra	Año previsto	Coste Acumulado	
		(km)	o Distrito			\$m	\$m
1	N1-2	20.5	2	Sellado	2000	5.4	5.4
2	N4-7	23.5	7	Refuerzo 40mm	2000	10.9	16.3
3	N2-5	12.5	5	Reconstrucción	2000	8.6	24.9
4	R312-1	30	4	Ampliar 4 carriles	2000	31.4	56.3
5	R458-3	36.2	3	Refuerzo 60mm	2000	16.3	72.6
:	:	:	:	:	:	:	:
1	N4-16	32.1	6	Reconstrucción	2001	22.8	22.8
2	R13-23	22.4	4	Refuerzo 40mm	2001	9.7	32.5
3	N521-5	45.2	2	Ampliar 4 carriles	2001	41.3	73.8
:	:	:	:	:	:	:	:
1	N1-6	30.2	4	Sellado	2002	8.2	8.2
2	N7-9	17.8	3	Refuerzo 60mm	2002	9.2	17.4
3	F2140-8	56.1	1	Reconstrucción	2002	34.9	52.3
:	:	:	:	:	:	:	:

Fuente: Manual del HDM-IV, Volumen 1, Pág. 20

3.3.3 Análisis del proyecto

El análisis de proyecto tiene relación con lo siguiente:

- Evaluación de uno o más proyectos de carreteras u opciones de inversión.
- La aplicación analiza un itinerario o tramo de carretera con los tratamientos seleccionados por el usuario, con los costes y beneficios asociados, proyectados anualmente a lo largo del período del análisis.
- Los indicadores económicos vienen determinados por las diferentes opciones de inversión.

Se puede usar el análisis de proyecto para estimar la viabilidad económica o técnica de los proyectos de inversión en carreteras, considerando los puntos siguientes:

- Comportamiento estructural de la estructura de pavimento.
- Previsiones de ciclo de vida del deterioro de la carretera, efectos y costes de las obras.
- Costes y beneficios de los usuarios, Comparaciones económicas de las alternativas al proyecto.

Los proyectos de análisis típicos incluyen la conservación y rehabilitación de carreteras existentes, modelos de ampliación en ancho y mejoras geométricas, mejora de la capacidad estructural del pavimento y nueva construcción.

Las relaciones de costes de usuarios incluyen los impactos sobre la seguridad de las carreteras. En términos de necesidades de datos, la diferencia clave entre los análisis de estrategias y de programa, con los de análisis de proyecto, está en el detalle con que se definen los datos.

3.4 Necesidad de datos

3.4.1 Visión general

Las aplicaciones HDM han sido diseñadas para trabajar con una amplia gama de tipos y calidades de datos. Por ejemplo, los datos del estado del pavimento recogidos en inspecciones visuales según las distintas condiciones (por ejemplo, muy bueno, bueno, regular o malo) se pueden convertir a las necesidades del modelo HDM antes de ejecutar cualquiera de las aplicaciones.

De forma similar, HDM puede trabajar con medidas detalladas del estado del firme, si se dispone de los datos. Esta flexibilidad en los datos requeridos debe permitir a todos los usuarios potenciales con datos distintos integrar HDM en sus funciones de gestión de carreteras.

En los siguientes sub capítulos se tratará de dar una idea de cómo ingresar datos de la red en estudio al HDM.

3.4.2 Configuración de HDM

Como HDM se utilizará en muy distintos entornos, la configuración de HDM proporciona funciones para personalizar la operación del sistema y para reflejar la normativa habitual en el entorno estudiado.

Los datos por defecto y los coeficientes de calibración se pueden definir de manera flexible para minimizar la cantidad de datos que se deben cambiar para cada aplicación de HDM, sin embargo, este proceso de calibración requiere consistencia en políticas de conservación o construcción de carreteras, debido a que la exactitud y precisión en la calibración del HDM es el éxito en la toma de decisiones sobre los indicadores y resultados que el programa pueda proveer.

Con HDM se suministran valores por defecto, pero todos ellos los puede definir el usuario y se proporcionan funciones para poder modificarlos. El conjunto de herramientas de HDM se pueden usar como módulos adicionales a los actuales sistemas de gestión de pavimentos.

Las funciones importar y exportar, integradas en los módulos, proporcionan un mecanismo para transferir datos entre las bases de datos existentes y los módulos HDM. El formato de intercambio de datos usa formatos de archivo estándar para fomentar su amplia adaptación por las organizaciones de carreteras.

3.4.3 Redes de carreteras

Redes de carreteras proporciona las funciones básicas para almacenar las características de uno o más tramos de carretera. Permite a los usuarios definir diferentes redes y subredes y definir tramos, que es la unidad fundamental de análisis. Las entidades de datos permitidas en la red de carreteras son:

- Tramos: Tramos de carretera en los que las características físicas son razonablemente constantes.

- Itinerarios: Comprenden uno o más tramos en los que el tráfico es razonablemente constante. Esto se ofrece para propósitos de compatibilidad de la red, referenciando el sistema con sistemas existentes de gestión de firmes.
- Nodos: Intersecciones que conectan itinerarios u otros puntos en los que hay un cambio significativo en el tráfico, en las características de los vehículos o en los límites administrativos.

Todos los datos de la red se introducen usando la carpeta Red de carreteras y también existen funciones para edición, borrado y mantenimiento de estos datos.

3.4.4 Parque de vehículos

Parques de vehículos proporciona funciones para almacenamiento y recuperación de las características de vehículos necesarias para calcular velocidades, costes de operación, costes de tiempos de viaje y otros efectos.

El método utilizado para representar un parque de vehículos es considerablemente adaptable y no tiene límites al número o tipo de vehículos que se pueden especificar. Se incluyen vehículos a motor y no motorizados.

Se pueden definir diversos juegos de Parques de vehículos para usarlos en diferentes análisis, suministrándose una amplia gama de datos por defecto.

3.4.5 Obras

Estándares de obras se refiere a los objetivos o niveles de condiciones y respuesta que se propone conseguir una organización de gestión de carreteras.

Las organizaciones de carreteras suelen definir diferentes estándares que se pueden aplicar en situaciones prácticas para satisfacer objetivos concretos que están relacionados con las características funcionales del sistema de la red de carreteras.

La carpeta Obras proporciona funciones, dentro de un marco flexible, para definir una lista de estándares de conservación y mejora que son observados por organizaciones de carreteras en la gestión de su red y en actividades de desarrollo. Los estándares definidos en la carpeta Estándares de obras se pueden usar en cualquiera de las tres herramientas de análisis: Análisis de proyecto, Análisis de programa y Análisis de estrategias.

4. APLICACIÓN DEL HDM A UN PROYECTO DE CARRETERAS

4.1 Generalidades

Es importante mencionar que puede existir un análisis social o un análisis de razonabilidad, para determinar si es viable el proyecto, pero este no será el caso de estudio, debido a que existen intereses políticos y sociales cuando se quiere implementar una mejora de un camino aunque no exista una inversión real de los recursos, por lo que se utilizará únicamente para considerar un enfoque técnico y económico.

El proyecto considerado se analizó como ejemplo de aplicación del HDM-III y específicamente para definir en qué consiste la evaluación técnica y económica, identificar los elementos necesarios para evaluar un proyecto, y explicar la metodología del HDM-III para obtener resultados.

Un concepto generalizado de la evaluación económica se basa en la figura 9, en la cual se comparan los costos contra los beneficios durante la vida útil del proyecto, y de ahí parte el concepto de viabilidad, es decir; un proyecto empieza a ser viable económicamente cuando los beneficios son mayores que los costos.

Figura 9. Gráfica de costos contra beneficios



Fuente: Lic. Ariel Elías, Presentación de Evaluación Económica, Diapositiva No. 4

4.2 Costo del sistema de transporte por carretera

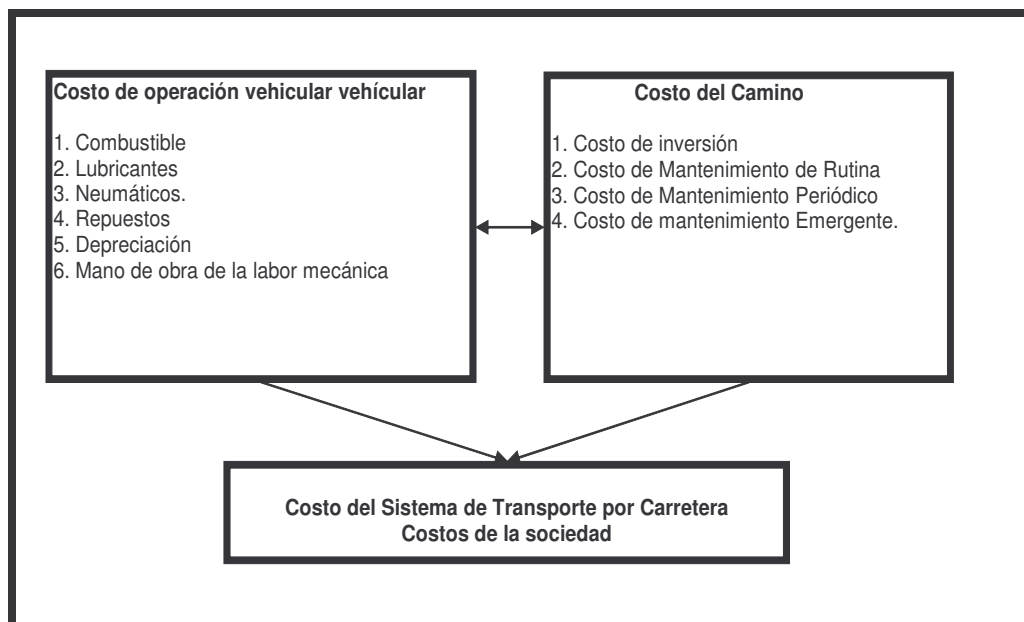
La DGC considera importante los siguientes elementos (figura 10), para involucrar los costos del sistema de transporte en la evaluación económica. De aquí que parte el análisis de los datos recolectados del proyecto.

Los costos provenientes del sistema de transporte por carretera se comparan con los beneficios que un buen nivel de servicio que pueda dar la inversión que se estimara. Tales beneficios pueden considerarse los siguientes:

- Disminuir los costos de operación vehicular
- Estimular el desarrollo económico
- Ahorro en el tiempo de viaje de pasajeros y carga
- Disminuye los accidentes

- Mejor comodidad y conveniencia
- Integración Nacional más efectiva
- Seguridad Nacional
- Mejor distribución de ingresos
- Prestigio del país
- Facilitar la obtención de servicios básicos; como salud, educación, mejor calidad de vida.
- Desarrollar el comercio en la zona
- Mejorar el uso de la tierra
- Facilitar la llegada de insumos agrícolas.

Figura 10. Costos del sistema de transporte por carretera



Fuente: Lic. Ariel Elías, Presentación de Evaluación Económica, Diapositiva No. 7

Para comprender como se opera el HDM-III, desarrollaremos el ejemplo del proyecto SAN MARTIN JILOTEPEQUE-JOYABAJ, el cual se trata de un tramo ubicado en el departamento de Quiché que posee una longitud de 40.00 km.

Se trata básicamente de mejorar la condición de la rodadura de una carretera de terracería con diferentes tipos de estrategias. Para darse una idea de lo que se pretende se muestran las siguientes situaciones.

Figura 11. Situación de la carretera antes de la intervención



Fuente: Lic. Ariel Elías, Presentación de Evaluación Económica, Diapositiva No. 10

Figura 12. Situación de la carretera esperada con la intervención



Fuente: Lic. Ariel Elías, Presentación de Evaluación Económica, Diapositiva No. 11

4.3 Datos técnicos de campo

4.3.1 Composición del tráfico promedio diario anual (TPDA)

Para empezar el análisis se necesitan los siguientes datos del tránsito. El reglamento de control de pesos y dimensiones especifica los siguientes vehículos en cuanto a su dimensión y peso.

- Automovil
- Camion
- Pick-Up
- Camion C-2
- Camion C-3
- Microbus
- Bus
- Camion C-4

4.3.2 Proyecciones de tránsito

- Tasa de crecimiento de la historia del tránsito
- Tasa de crecimiento de la población
- Tasa de crecimiento del PIB
- Tasa de crecimiento del sector agrícola

4.3.3 Tipos de tránsito

- Tránsito normal: derivado de la actividad diaria de la población en estudio.

- Tránsito generado: derivado de la inclusión de un nuevo flujo vehicular por la intervención en el mejoramiento de la carretera.
- Tránsito desviado: derivado de otras rutas alternas que se integran a la ruta en la que se hace la intervención del mejoramiento.

4.4 Indicadores de rentabilidad

Los indicadores de rentabilidad usados por el departamento de pre inversión de la DGC para el análisis económico, se describen a continuación.

- Tasa interna de retorno (TIR): la tasa interna de retorno o tasa interna de rentabilidad de una inversión, está definida como la tasa de interés con la cual el valor actual neto o valor presente neto (VAN o VPN) es igual a cero. El VAN o VPN es calculado a partir del flujo de caja anual, trasladando todas las cantidades futuras al presente, La TIR es una herramienta de toma de decisiones de inversión utilizada para comparar la factibilidad de diferentes opciones de inversión. generalmente, la opción de inversión con la TIR más alta es la preferida. La DGC propone una TIR mayor del 12% para la evaluación.
- Relación beneficio costo (B/C): el costo-beneficio es una lógica o razonamiento basado en el principio de obtener los mayores y mejores resultados al menor esfuerzo invertido, tanto por eficiencia técnica como por motivación humana. Por lo tanto, la DGC tomara como aceptable la inversión mientras presente un costo beneficio mayor a 1.00.

- Valor actual neto (VAN): es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros. El método, además, descuenta una determinada tasa o tipo de interés igual para todo el período considerado. Para que un proyecto de carreteras se viable el VAN tiene que cumplir con que sea positivo y obtenga un valor de 5.

Para resumir los indicadores de rentabilidad se presenta la siguiente tabla, la cual muestra el margen en que oscilan estos índices para aceptar como viable el proyecto en estudio.

Tabla I Margen de valores de los Indicadores de Rentabilidad

MENOR VALOR ACEPTADO	INDICADOR DE RENTABILIDAD	VALOR PROMEDIO ESPERADO
8 %	TIR	13%
-5.00 %	VAN O VPN	5.00 %
0.8	B/C	1.20

5.5 Análisis de sensibilidad

Se realiza para determinar la sensibilidad de la evaluación ante de las modificaciones de los costos y beneficios en el flujo del proyecto

Para asegurarse de que la inversión sea funcional, se la aplica un análisis de sensibilidad para estudiar el comportamiento del dinero con ajustes a los parámetros de rentabilidad.

En este análisis la DGC castiga el estudio con un incremento de los costos en un 20%, se hace un decremento de los beneficios en un 20%. Por último, se unen los dos anteriores para determinar si los indicadores aguantan con el castigo del evaluador. Si los indicadores cumplen con las condiciones propuestas anteriormente el proyecto se determina viable.

5. EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL PROYECTO

5.1 Generalidades

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

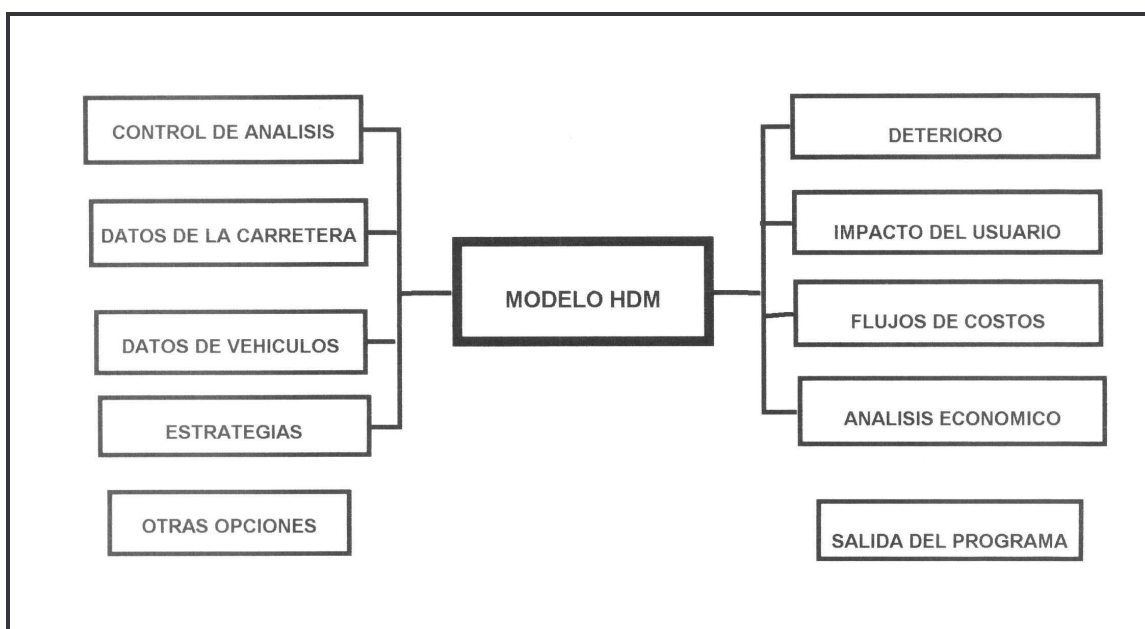
Esta herramienta tiene la característica de poder manejar tanto datos técnicos como económicos modelando los deterioros y recomendando acciones de conservación con sus respectivos costos e inversiones a lo largo de la vida útil del proyecto.

La DGC considera el modelo de normas de conservación y diseño de carreteras (HDM) como un programa para analizar los costos totales del transporte de distintas estrategias mediante la evaluación económica, durante la vida útil de las mismas, y considera la arquitectura del modelo siguiendo el esquema de la figura 13.

El programa ofrece una modelación detallada de:

- Deterioro de la carretera
- Los efectos de las tareas de mantenimiento
- Costos anuales de construcción
- Costos de operación de vehículos
- Tiempo empleado en el recorrido del tramo

Figura 13 Arquitectura del modelo HDM



Fuente: Lic. Ariel Elías, Presentación de Evaluación Económica, Diapositiva No. 20

5.2 Datos ingresados a HDM

5.2.1 Datos para el control de análisis

- a. Nombre del proyecto
- b. Fecha de evaluación
- c. Tasa de descuento en % , (se utiliza el valor de 0.12 por año)
- d. Periodo de análisis en años, (generalmente es de 20 años)
- e. Año calendario del año inicial
- f. Nombre de la moneda de entrada
- g. Nombre de la moneda de salida
- h. Multiplicador de conversión de la moneda (Q. por US \$)

5.2.2 Datos de la situación actual de la carretera

- Tipo de rodadura
 - a. Pavimentada
 - b. No pavimentada

- Geometría de la sección
 - a. Longitud (kilómetros)
 - b. Ancho del hombro (metros)
 - c. Subidas más bajadas (metros/kilometro)
 - d. Peralte (%)
 - e. Ancho de calzada (metros)
 - f. Número efectivo de carriles (cantidad)
 - g. Curvatura (Grados)

- Medio Ambiente
 - a. Altitud (MSNM.)
 - b. Precipitación pluvial (mm/mes)

- Estado de la carretera
 - a. Espesor de la grava (mm)
 - b. Rugosidad IRI (mm)
 - c. Código de compactación (1.= Mecánica, 2.= No Mecánica)
 - d. Edad de la grava (en años)

- Superficie, Base, Sub bases y Sub rasante
 - a. Rugosidad mínima IRI (mm)
 - b. Rugosidad máxima IRI (mm)
 - c. Índice de plasticidad (%)
 - d. Tamaño de partícula máxima (mm)

- e. Material que pasa el tamiz de 2.000 (%)
- f. Material que pasa el tamiz de 0.425 (%)
- g. Material que pasa el tamiz de 0.075 (%)

5.2.3 Datos de los vehículos

- Tráfico: Al número de vehículos que transitan por la red en un día promedio se le llama tráfico promedio anual TPDA, esta medida puede tomarse por distintos métodos y uno de los más empleados es el de un conteo durante dos días, para reportar la cantidad y el tipo de vehículos que circulan sobre la superficie de pavimento. A continuación el tipo y número de los vehículos que circulan por el tramo en estudio.

Tabla II Valores de tráfico promedio diario anual (TPDA)

Descripción	TPDA	Auto	Pick up	Microbús	Bus	Camión C-2	Camión C-3	Camión C-4
Tráfico diario medio Anual	110	25	35	10	15	12	10	3
Tasa de crecimiento anual (%)		4.0	4.0	4.0	3.5	3.5	3.5	2.0

- Datos de los vehículos: En Guatemala se utiliza el Reglamento para el Control de Pesos y Dimensiones de Vehículos Automotores y sus Combinaciones, para normar el peso máximo que pueden transportar los vehículos, así como el número de ejes, neumáticos y pasajeros. A continuación las características básicas de los vehículos que circulan por el tramo en estudio.

Tabla III Características físicas de los vehículos

Características básicas	Auto	Pick up	Bus	Microbús	Camión C-2	Camión C-3	Camión C-4
Peso bruto vehicular (t)	1.200	1.800	19.900	5.600	11.30	20.80	27.00
No. ejes equivalentes E4	0.000	0.010	0.800	0.200	1.000	2.000	4.000
Número de ejes	2	2	2	2	2	3	5
Número de neumáticos	2	4	6	6	6	10	18
Número de pasajeros	2.3	2.3	30	1	1	1	1

- Utilización del vehículo: Se refieren a estadísticas de usos sobre los vehículos, las cuales dependerán de la actividad que se ejecute.

Tabla IV Características de la utilización del vehículo

Características básicas	Auto	Pick up	Bus	Micro bus	Camión C-2	Camión C-3	Camión C-4
Vida útil (años)	12.0	12.0	15.0	14.0	13.0	12.0	12.0
Horas conducidas año	450	1300	2000	1300	2100	2100	2100
Km. conducidos año	20,000	30,000	65,000	50,000	65,000	75,000	90,000
Código de depreciación	2	2	1	1	1	1	1
Código de utilización	1	3	3	3	3	3	3
Tasa de interés anual (%)	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00

- Costos económicos unitarios: Dentro de los costos del vehículo incluimos aquellos datos que representen un significativo gasto para el automotor y sus pasajeros.

Tabla V Costos económicos unitarios de vehículos

Características básicas	Auto	Pick up	Bus	Micro bus	Camión C-2	Camión C-3	Camión C-4
Vehículo nuevo (M)	9000	12000	55000	20000	30000	60000	75000
Neumático nuevo (M)	60.0	60.0	275.0	275.0	275.0	275.0	275.0
Mano de obra (M/hr)	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20
Tripulación (M/trio-kv hora)	1.0	1.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Tiempo pasajero (M/pa-hr)	0.50	0.50	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Tiempo de carga (M/veh-hr)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000

- Precios de combustibles: Los precios se tomaran por litro de combustible, debido a que este es un factor que varia continuamente y depende del mercado internacional. Por lo que es importante actualizarlo continuamente.

Tabla VI Precios de los combustibles

Características básicas	Precio
Precio gasolina (M/litro)	0.32
Precio diesel (M/litro)	0.28
Precio lubricantes (M/litro)	1.90

- Costos unitarios de operación: Se refieren al precio de los renglones de trabajo periódicos necesarios para conserva la red de pavimentos de tal forma que presten un buen nivel de servicio.

Tabla VII Costos unitarios de operación

Características básicas	Precio Financiero	Precio Económico
Perfilado (Moneda por km.de camino perfilado)	1500.00	1300.00
Bacheo de grava localizado (moneda por m3)	15.0	13.0
Reposición de grava (Moneda por km por año)	13.50	12.0
Mantenimiento de rutina No. Pav.(moneda por kilómetro por año)	2125	1806
Bacheo (moneda por m2)	20.30	16.40
Sello (moneda por m2)	4.0	3.5
Refuerzo (moneda por m2)	19.0	16.0
Reconstrucción (moneda por m2)	45.0	40.0
Mantenimiento de rutina pavimentado (moneda por Km. Al año)	250	212
Construcción (miles de moneda por año)	507.1	431.0

5.2.4 Datos de las estrategias asignadas

Entre las estrategias tenemos los tratamientos posibles, que se pueden emplear en mejorar el tramo, cada una de ellas representa una inversión inicial alta que tomara un lugar en la evaluación técnica y económica debido a que los costos de cada una de ellas varían en función de la necesidad de emplearlas.

- Conformación
- Carpeta asfáltica
- Doble tratamiento superficial
- Tratamiento superficial simple
- Carpeta asfáltica en caliente

Entre las políticas de mantenimiento, se mencionan los trabajos que se ejecutan periódicamente, de forma que se mantenga la ruta en condiciones transitables, estos trabajos representa una inversión baja, pero continua, es decir; tienen que realizarse año con año.

- Mantenimiento de rutina, (limpieza del derecho de vía y drenajes).
- Perfilado
- Conformación
- Bacheo manual
- Reposición de la capa de balasto

5.2.5 Datos de los factores de deterioro

Para representar el estado de los daños sobre el pavimento se utiliza una calificación de uno a cinco, para determinar el nivel de daños que posee el pavimento.

Los daños superficiales que aplican al HDM integrados por la DGC se describen a continuación.

Por definición se toma el valor de uno, debido a que si no se obtiene un nivel mínimo de daño superficial, no tendría sentido la evaluación de la mejora.

Tabla VIII Índice de daño superficial

Variable	Unidad de medida
Iniciación de grietas	1.0
Iniciación de peladuras	1.0
Progresión de baches	1.0
Factor del medio ambiente	1.0
Progresión de grietas	1.0
Progresión de roderas	1.0

5.2.6 Datos de los impactos sobre el usuario

Los costos de operación vehicular (COV) impactan directamente sobre los usuarios de los vehículos que circulan por la red, estos costos varían dependiendo del tipo de rodadura en que se transite y del tipo de vehículo.

El análisis de estos datos radica en que el mejoramiento de una situación de terracería a una situación con pavimento asfáltico o sus tratamientos derivados, esto disminuye los COV, y donde la medida más importante prevalece en que porcentaje disminuyen sobre los costos de tener una carretera sin asfalto pues al final se obtiene la media de la lista de tipos de vehículos para determinar el ahorro total, el cual nos servirá para tener un índice técnico de la evaluación de la mejora del tramo, como se muestra a continuación.

Tabla IX Parámetros de costos de operación vehicular

Descripción	Auto	Pick up	Microbús	Bus	Camión C-2	Camión C-3	Camión C-4
COV S/P (Tierra)	0.50	0.67	1.69	1.87	1.68	2.98	3.07
COV C/P (Asfalto)	0.17	0.19	0.59	0.83	0.61	1.20	1.28
Decremento COV	0.33	0.48	1.10	1.04	1.07	1.78	1.79
Porcentaje	66.00	71.64	65.09	55.61	63.69	59.73	58.31
Ahorro en COV de la flota total	62.86%						

5.3 Corrida del programa HDM-III

Una vez ingresada la información anterior la unidad de planificación se encarga de correr el programa para obtener los resultados. Esta información es realmente valiosa para la toma de decisiones.

Las siguientes tablas fueron extraídas de la evaluación económica para el mejoramiento del tramo San Pedro Carcha - El Pajal realizada en el año 2004, las cuales proporcionan un esquema detallado a 20 años de los costos y beneficios que implica la mejora del proyecto, es importante mencionar que los datos son presentados como ejemplo para dar a conocer la capacidad del HDM-III y de los cuales solo se tendrán resultados finales.

Tabla X Situación con y sin proyecto

Descripción	Sin proyecto	Con proyecto
Longitud (km.)	40.0	38.8
Tipo de rodadura	Terracería	DTS
Pendiente m/km.	300	200
Altitud (msnm)	1610	1610
Precipitación Pluvial (mm)	1500	1500
Curvatura (grados km)	300	250
Rugosidad (mm)	20	2

Tabla XI Costo por kilometro con y sin proyecto

Descripción	Costos US \$
Inversión inicial (DTS)	250,000.00
Mantenimiento Rutinario S/P (anual)	1,020,000.00
Mantenimiento Rutinario C/P (Anual)	116,400.00
Mantenimiento Periódico (Recapeo) C/P	62,500.00

Las tablas que se muestran a continuación fueron escogidas debido a que fueron las que menores costos y mayores beneficios presentaron en sus análisis. Además de ser las más representativas para nuestros fines analíticos.

Las siguientes tablas son extraídas directamente del análisis efectuado por el *Software* HDM-III, para el ejemplo propuesto en el capítulo 5. “Es importante mencionar que *Software* contiene aproximadamente 800 expresiones matemáticas para relacionar todos los datos ingresados y procesar la información”⁸ girando los datos que a continuación presentamos.

⁸ Definiciones ofrecidas por el Lic. Ariel Elías, Departamento de Pre Inversión, DGC.

Tabla XII Alternativas de inversión menos costosas definidas por el HDM según ejemplo

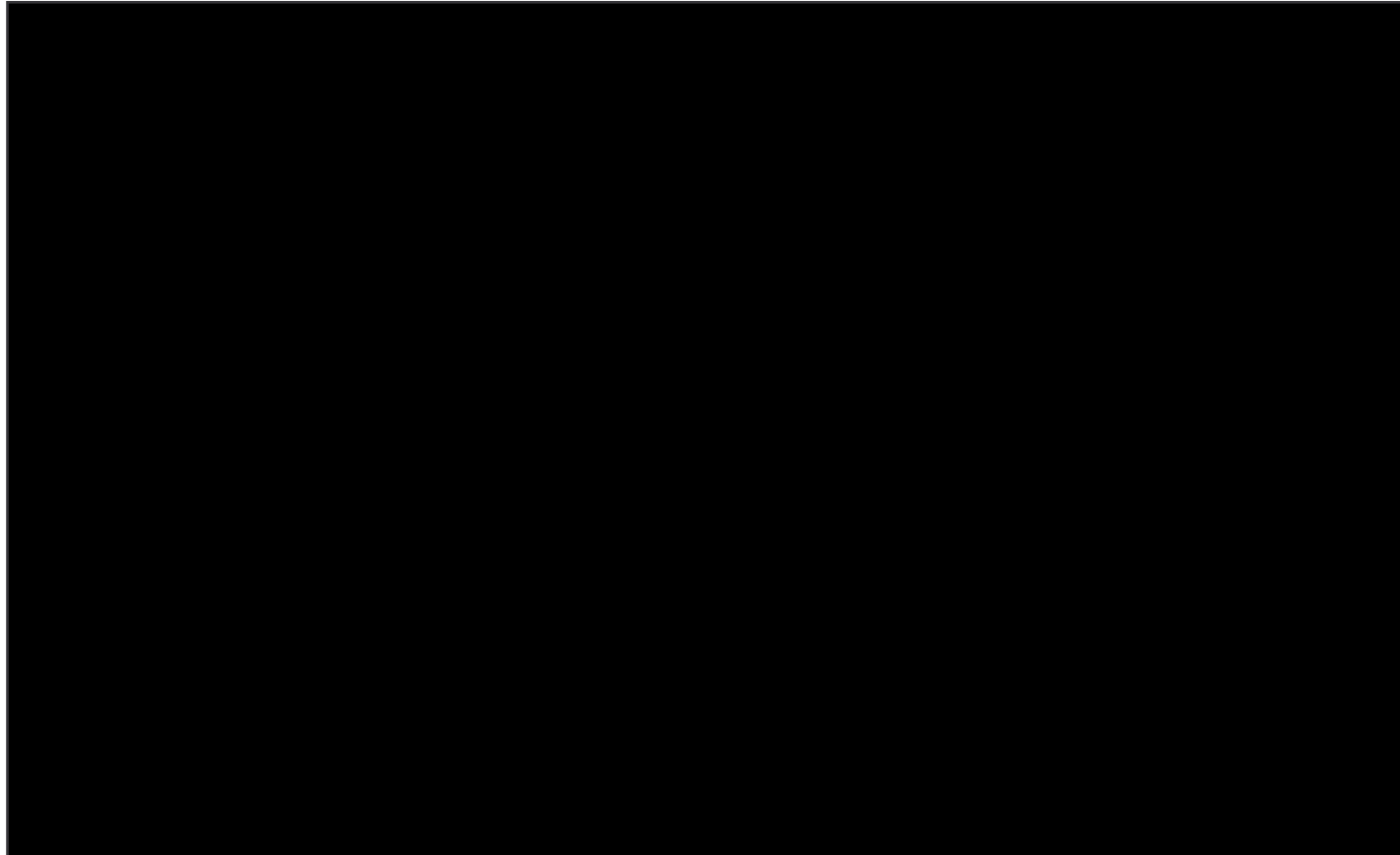


Tabla XIII Costos de mantenimiento con y sin proyecto




Tabla XIV Costo de operación vehicular con y sin proyecto

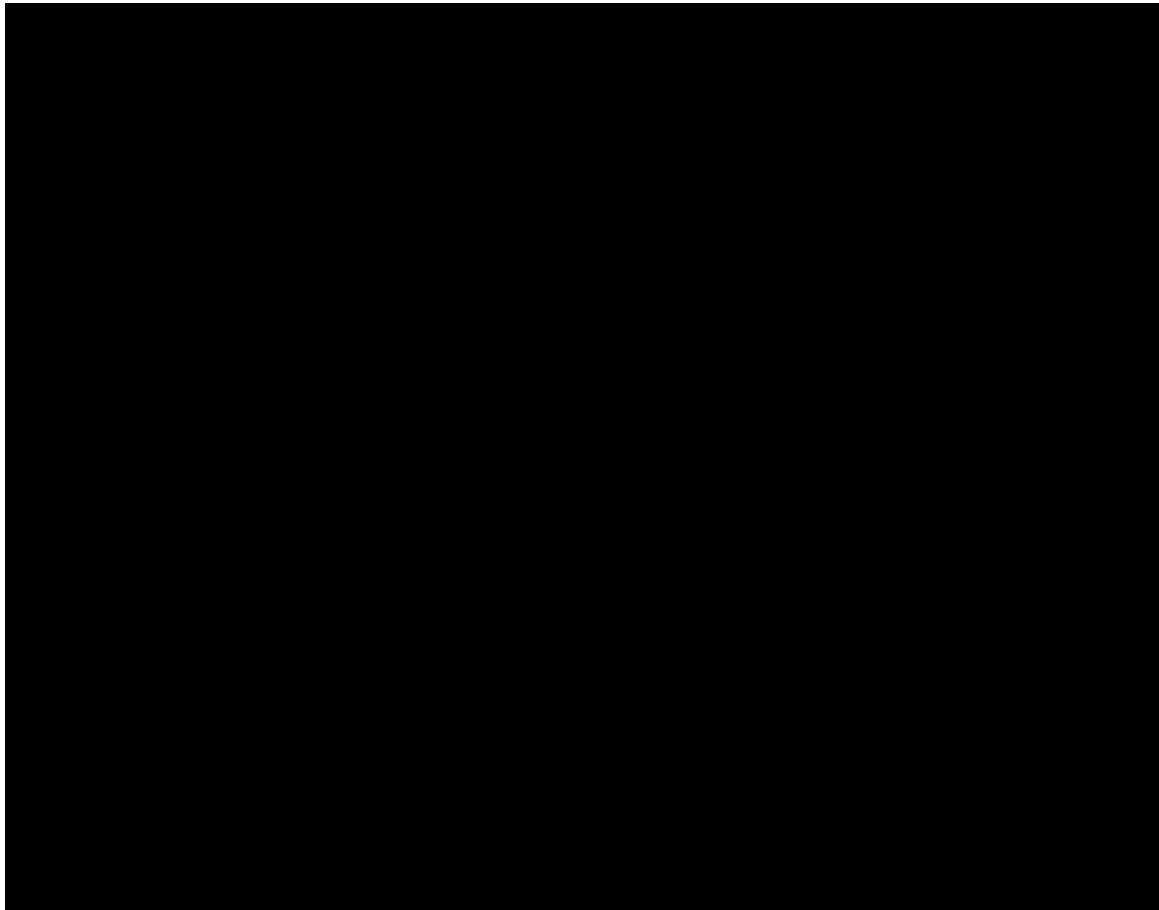


Tabla XV Transito promedio diario anual esperado




Tabla XVI Costo de operación vehicular sin proyecto por año.

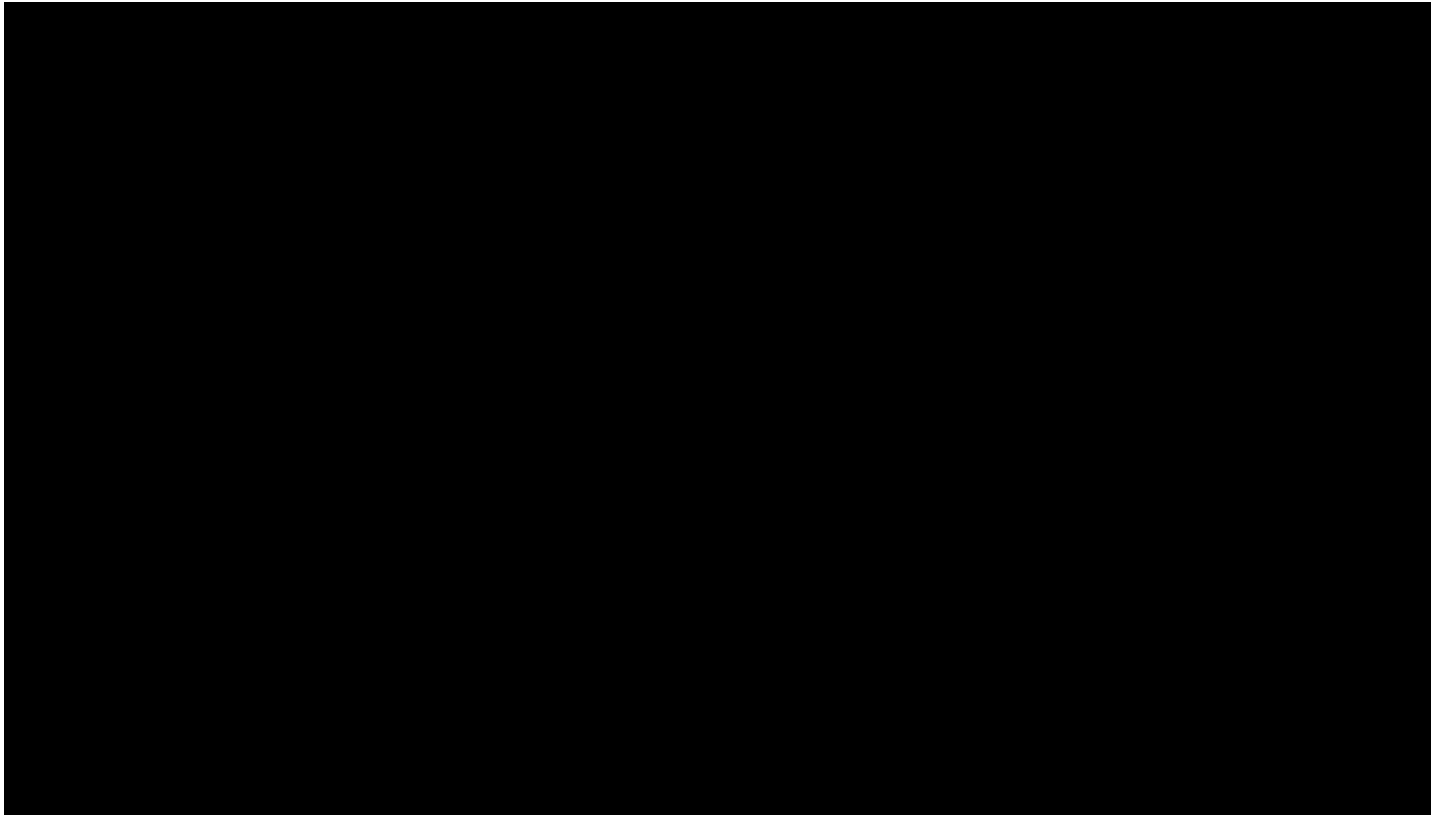


Tabla XVII Costo de operación vehicular con proyecto por año.

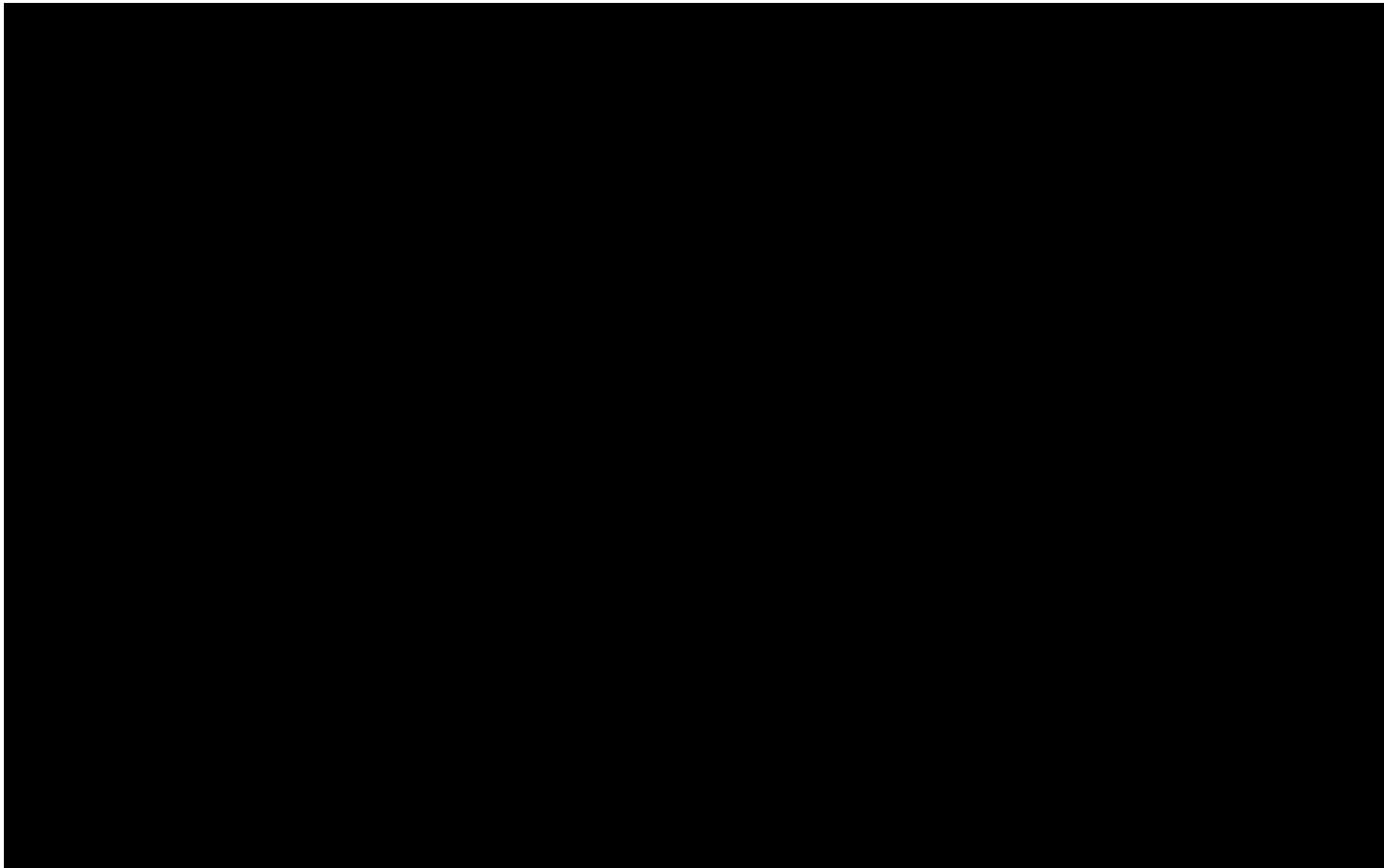


Tabla XVIII Ahorros en costo de operación vehicular del proyecto por año



Tabla XIX Evaluación económica del proyecto por el programa HDM

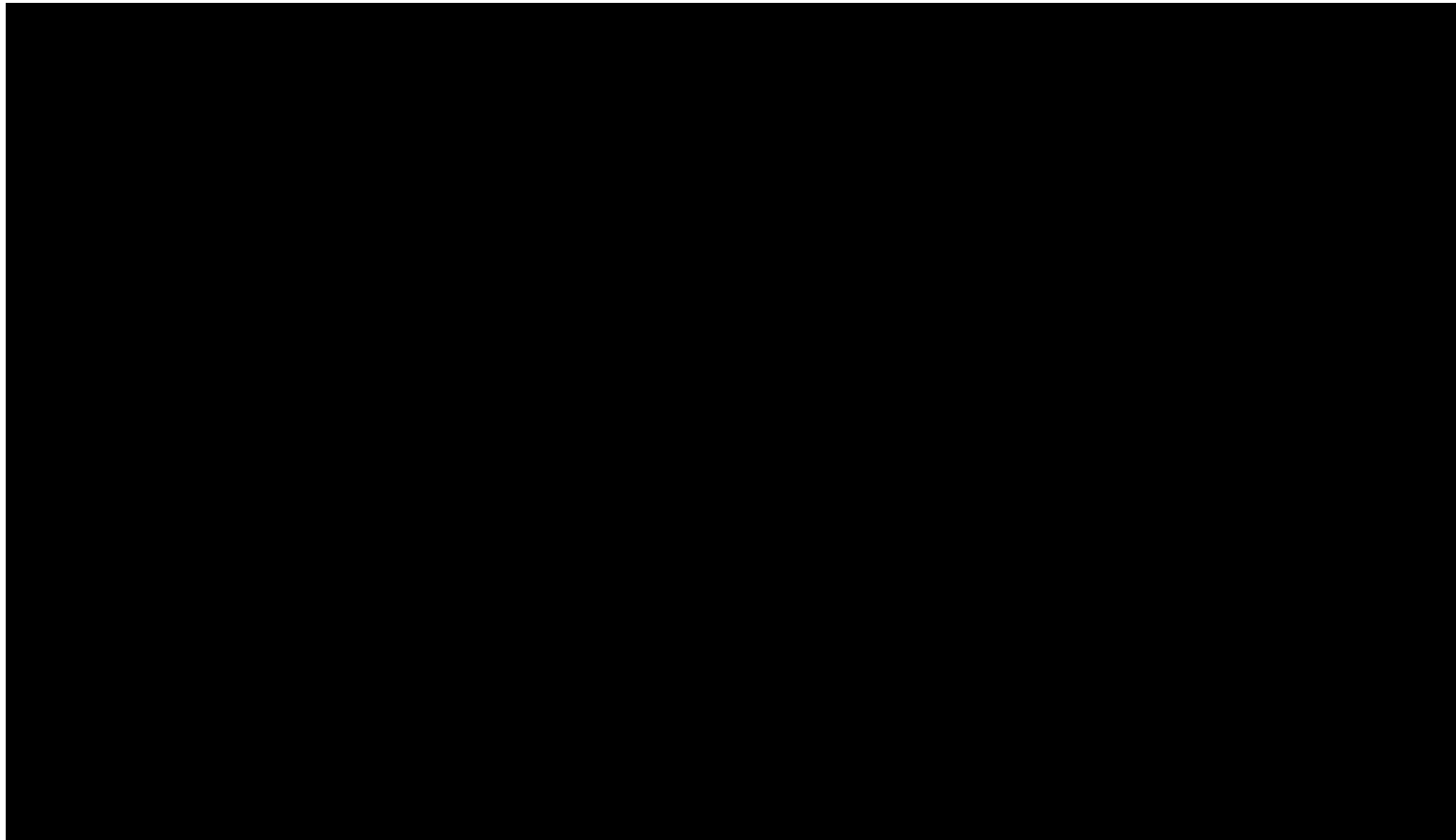


Tabla XX Sensibilidad económica: incremento del 20% de los costos

AÑO	N	FACTOR DE ACTUALIZACIÓN AL 12%	COSTOS DEL PROYECTO	AHORROS EN COV	AHORROS EN MANTENIMIENTO	TOTAL DE AHORROS BRUTOS DEL PROYECTO	COSTOS ACTUALIZADOS	BENEFICIOS ACTUALIZADOS	VALOR ACTUALIZADO DEL PROYECTO
2004	0	1.000000000	5,820,000.00			-5,820,000.00	5,820,000.00	0.00	-5,820,000.00
2005	1	0.892857143	5,820,000.00			-5,820,000.00	5,196,428.57	0.00	-5,196,428.57
2006	2	0.797193878		1,401,301.19	903,600.00	2,304,901.19	0.00	1,837,453.12	1,837,453.12
2007	3	0.711780248		1,453,940.50	903,600.00	2,357,540.50	0.00	1,678,050.76	1,678,050.76
2008	4	0.635518078		1,508,720.24	903,600.00	2,412,320.24	0.00	1,533,073.13	1,533,073.13
2009	5	0.567426856		1,563,355.86	903,600.00	2,466,955.86	0.00	1,399,817.01	1,399,817.01
2010	6	0.506631121		1,622,695.14	903,600.00	2,526,295.14	0.00	1,279,899.74	1,279,899.74
2011	7	0.452349215		1,675,058.04	903,600.00	2,578,658.04	0.00	1,166,453.94	1,166,453.94
2012	8	0.403883228		1,735,794.90	903,600.00	2,639,394.90	0.00	1,066,007.33	1,066,007.33
2013	9	0.360610025		1,798,769.68	903,600.00	2,702,369.68	0.00	974,501.60	974,501.60
2014	10	0.321973237		1,864,065.75	-1,405,000.00	459,065.75	0.00	147,806.89	147,806.89
2015	11	0.287476104		1,931,769.61	903,600.00	2,835,369.61	0.00	815,101.01	815,101.01
2016	12	0.256675093		2,007,814.77	903,600.00	2,911,414.77	0.00	747,287.66	747,287.66
2017	13	0.229174190		2,081,407.17	903,600.00	2,985,007.17	0.00	684,086.60	684,086.60
2018	14	0.204619813		2,153,212.63	903,600.00	3,056,812.63	0.00	625,484.43	625,484.43
2019	15	0.182696261		2,228,767.61	903,600.00	3,132,367.61	0.00	572,271.85	572,271.85
2020	16	0.163121662		2,307,315.12	903,600.00	3,210,915.12	0.00	523,769.81	523,769.81
2021	17	0.145644341		2,388,274.74	903,600.00	3,291,874.74	0.00	479,442.93	479,442.93
2022	18	0.130039590		2,475,380.16	903,600.00	3,378,980.16	0.00	439,401.20	439,401.20
2023	19	0.116106777		2,573,287.05	903,600.00	3,476,887.05	0.00	403,690.15	403,690.15
						48,727,130.18	11,016,428.57	16,373,599.14	
Valor Actual Neto al 12%									5,357,170.57
Tasa Interna de Retorno %									18.54
Relación Beneficio Costo B/C (US\$)									1.49

Tabla XXI Sensibilidad económica: decremento del 20% de los beneficios

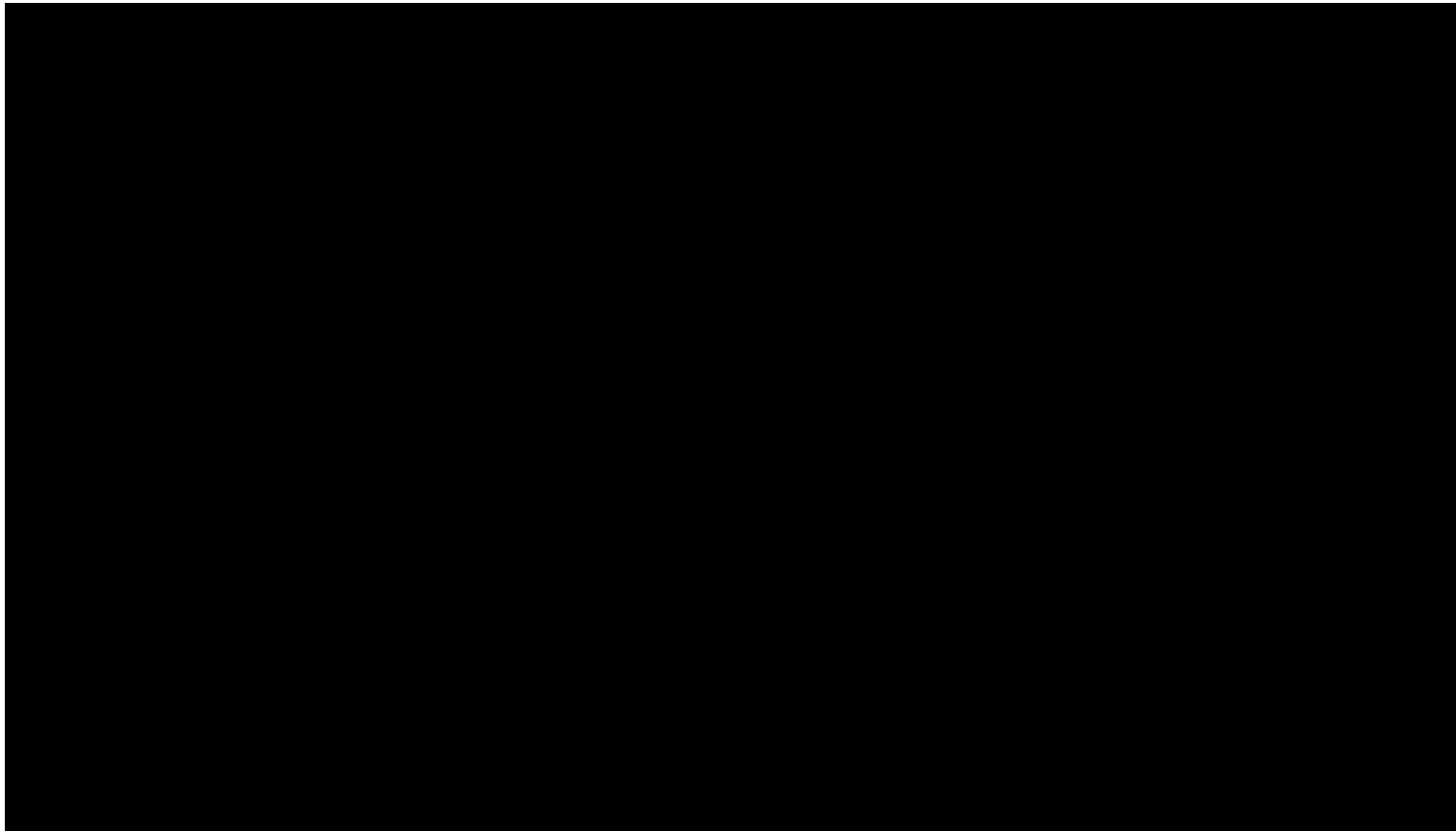


Tabla XXII Sensibilidad económica: + 20% de los costos y -20% de los beneficios

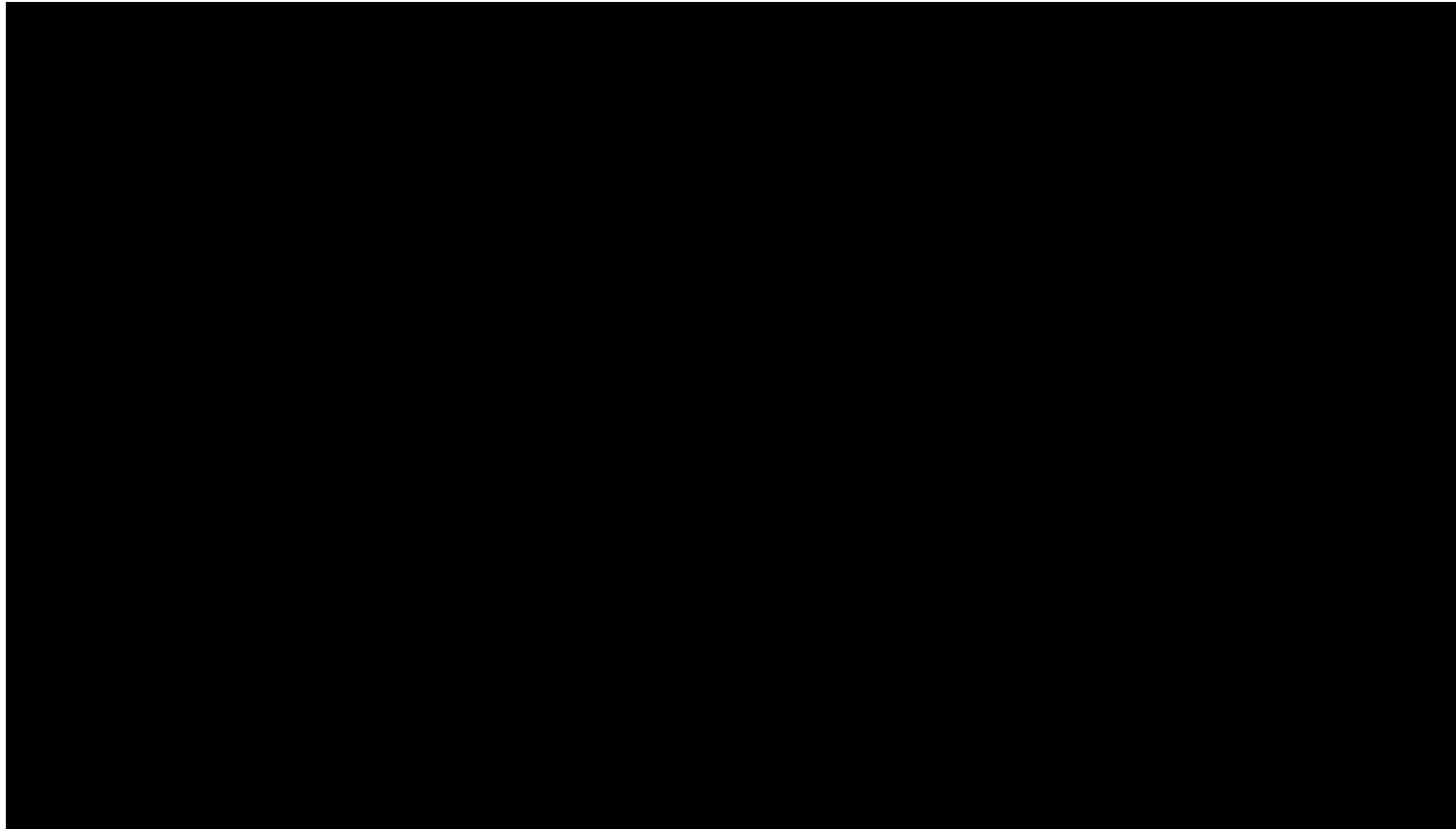


Tabla XXIII Resumen del análisis de sensibilidad

INDICADORES DE RENTABILIDAD	Evaluación Normal	Incremento del 20% de costos de construcción	Decremento del 20% de los Beneficios	Incremento del 20% de costos de construcción y decremento de 20% de beneficios
Valor actual neto al 12%	7,193,242.00	5,357,170.57	3,918,522.17	2,082,450.74
Tasa Interna de Retorno (%)	22.14	18.54	17.79	14.67
Relación Beneficio Costo B/C	1.78	1.49	1.43	1.19

5.4 Análisis de resultados

Básicamente lo que el modelo realiza en cada proyecto o tramo seleccionado es determinar, para cada uno de los estándares de mantenimiento o mejoramiento, el momento en que cualquiera de las operaciones de conservación de ellos sería aplicable, además de definir la inversión inicial y el flujo de fondos para el mantenimiento del mismo durante el periodo considerado.

De esta manera, para cada estándar, determina los costos en cada uno de los 20 años del período de análisis, por los siguientes conceptos: acciones de conservación preventiva y correctiva, acciones de mantenimiento rutinario, operación vehicular y totales (o suma de los anteriores); asimismo, para cada uno de los rubros anteriores, determina la suma de costos descontados para el período de análisis, considerando tasas anuales de descuento del 12%.

De esta cuenta se determina que la intervención en el tramo con un doble tratamiento superficial (DTS), es la mejor opción de inversión según las características del tránsito, niveles de servicio y condiciones de la superficie de rodadura que en ese momento es de terracería.

La importancia de aumentar los costos en un 20% y disminuir los beneficios en un 20%, radica en que la inversión en el doble tratamiento superficial (DTS), es factible para cubrir con las necesidades de mejoras en este tramo de 40.00 km, si las perspectivas consideradas al inicio el análisis tuviesen un cambio brusco en el transcurso del periodo de vida.

El ejemplo anteriormente analizado es básico desde todo punto de vista, pero definitivamente proporciona una información valiosa para apoyarse en la toma de decisiones.

CONCLUSIONES

1. Los sistemas de gestión de pavimentos SGP nacen de la necesidad de optimizar los fondos de una agencia de carreteras, para financiar obras de mantenimiento y mejoramiento de las redes de carretera bajo su cargo.
2. Los sistemas de gestión de pavimentos se relaciona de manera directa con el HDM, de tal forma que este actúa como una herramienta para la integración y organización de los datos provenientes del estudio de campo, para luego definir el tipo de intervención económica, a fin de mejorar los niveles de servicio del pavimento partiendo de estrategias definidas por la agencia de carreteras.
3. El HDM está configurado por una base matemática que combina modelos de deterioro como extrapolación lineal, regresión y probabilidad para representar la evolución del estado del pavimento en el tiempo.
4. Debido al complejo sistema del HDM es necesario definir un procedimiento de calibración antes de poder utilizar completamente el sistema, para obtener un modelo de predicción ajustado que ofrezca estimaciones realistas y confiables para establecer planes de conservación vial que tiendan a optimizar los recursos disponibles y minimizar los costos de operación de la carretera.

5. La aplicación del HDM a un proyecto de carreteras se basa en el análisis de estrategia, programa y proyecto que en su conjunto predicen las necesidades de la red, definen la asignación de trabajos prioritarios para crear un programa de obras de uno o más años, los cuales estiman la viabilidad económica de las alternativas de inversión.
6. Para la evaluación técnica de un proyecto de carreteras el HDM involucra los costos del sistema de transporte y los costos asociados con el camino, necesita datos técnicos que se extraen de inventarios viales, conteos de tránsito, evaluaciones del estado del pavimento y factores climáticos.
7. La evaluación económica se determina por indicadores de rentabilidad como la TIR, VAN y B/C. Los cuales definen la viabilidad de un proyecto si estos cumplen con los parámetros de calificación impuestos por la agencia de carreteras.
8. Entre los conceptos importantes para la evaluación económica se define el análisis de sensibilidad, ya que este proporciona una justificación de la inversión en condiciones holgadas de costos, condiciones reducidas de beneficios y ambas condiciones integradas para cumplir con los parámetros de calificación y así tener certeza que la inversión elegida sea la más óptima.
9. El HDM proporciona una herramienta poderosa para la toma de decisiones, sobre las alternativas de inversión de un proyecto de carreteras. El personal de una agencia de carreteras es el encargado de definir cuál será la inversión o estrategia más favorable de acuerdo a la realidad de la agencia y a las necesidades de la red considerada.

RECOMENDACIONES

1. Es indispensable determinar un único procedimiento para la administración y gestión de una red de pavimentos, asistido por una herramienta como el HDM, que sea fácil y accesible para usuarios de agencias de carreteras.
2. La optimización de los recursos del estado es urgente para la conservación de nuestras carreteras, debido a que carreteras con un buen nivel de servicio estimulan la actividad económica del país, una mejor integración nacional y una reducción en los costos de los usuarios.
3. Debido a que la conservación de una carretera supera el costo de una escuela o un centro de salud, es importante cuidar cada centavo del presupuesto de inversión.
4. La implementación del HDM favorece la macroeconomía del país, debido a que el mercado interno y externo necesita una infraestructura vial eficiente, capaz y segura para facilitar el intercambio de servicios.
5. Es necesario invertir en la investigación de modelos de deterioro de pavimentos confiables y auto sostenibles, que proveen la certeza necesaria para la toma de decisiones

BIBLIOGRAFÍA

1. AASHTO “*AASHTO Guidelines for Pavement Management System*”, American Association of State Highways and Transportation Officials. Washington D.C. Julio 1990.
2. ASTM “*American Society for Testing and Materials*”, *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. Baca Urbina Gabriel. “Evaluación de proyectos. 4ª. Edición”, Editorial McGrawHill, 2002.
4. de Solminihac, H., “Gestión de Infraestructura Vial”, Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago 2001.
5. de Solminihac H.; Hidalgo, P.; Bengoa, E, “*Calibration of HDM-4 Structural Cracking Models for Asphalt Pavements*”, *Transportation Research Board, 81th Annual Meeting*, Enero, 13-17, 2002, Washington, D.C.
6. Dra. Bengoa Pérez Elva. “Descripción de Sistemas de Gestión de Pavimentos y uso de los Programas HDM-III y HDM-4”, Ingeniera Civil Pontificia Universidad Católica del Perú.

7. Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes. Dirección General de Caminos, Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda, 2001.
8. Especificaciones de Mantenimiento del Programa de Mantenimiento de Conservación Vial (COVIAL), CIV 2008.
9. Guzmán Joaquín y Rallo Antonio. "Estructura Económica Mundial. 2ª. Edición", 1998.
10. "HDM-4 Highway Development and Management, Versión 1". World Road Association, 2000.
11. Laj González Jaime Luis. "Estudios de Preinversión" , 2001-2003.
12. Kerali Henry G.R. "*HDM-4: Highway Development and Management*". *Volume One: Overview of HDM-4*. París, Francia. Asociación Mundial de Carreteras (PIARC), (2000).
13. Kramer Carlos y otros. "Ingeniería de Carreteras", Editorial Mc Graw Hill, España Madrid, 2003 – 2004, Tomo I, numerales 20, 21 y 24.
14. Merrit, Loftin y Ricketts, "Manual del Ingeniero Civil. 4ª. Edición", Editorial McGrawHill, 1999.
15. Paterson William D.O. "Road Deterioration and Maintenance Effects: Models for Planning and Management" Highway Design and Maintenance Standards Series, World Bank Transportation Department, Washington D.C., 1987.

16. Solorio Murillo Ricardo y otros. "Análisis de Sensibilidad de Los Modelos de Deterioro del HDM-4 para Pavimentos Asfálticos", Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No 253, Sanfandila, Qro, 2004.
17. Mendoza Díaz Alberto y otros. "Aplicación Del HDM–III A La Red Carretera Federal Del Estado De Puebla", Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 164, Sanfandila, Qro. 2001.
18. THAWAAT, Watanatada, et al. "*HDM-PC The Highways Design and Maintenance Standards Model, User's Manual for HDM-III Model*". Washington, D. C. (E.U.A.); World Bank, 1987.

