

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

---



**APLICACIÓN DE HDM-4 A LA EVALUACIÓN DE PROYECTOS DE  
MEJORA Y NUEVA CONSTRUCCIÓN**

POR:

**JOSÉ MARÍA ZEPEDA HERNÁNDEZ**

**TESIS, TESINA O ESTUDIO DE CASO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA  
OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRIA EN INGENIERIA DE VÍAS TERRESTRES**



Aplicación de HDM-4 para la evaluación de proyectos de mejora y nueva construcción. Tesis presentada por José María Zepeda Hernández como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Vías Terrestres, ha sido aprobada y aceptada por:

---

**M.I. Javier González Cantú**  
Director de la Facultad de Ingeniería

---

**Dr. Alejandro Villalobos Aragón**  
Secretario de Investigación y Posgrado

---

**M.C. Alejandro Calderón Landaverde**  
Coordinador Académico

Daphne Espejel G.

---

**Dra. Daphne Espejel García**  
Directora de Tesis

**Noviembre 2019**

---

Fecha

Comité:

**Dra. Daphne Espejel García**  
**M.C. Alejandro Calderón Landaverde**  
**M.I. José Antonio Portillo Ocegüera**  
**Dr. Paul Garnica Anguas**

© Derechos Reservados

**José María Zepeda Hernández**  
Circuito Universitario No. 1  
Campus 2,  
Chihuahua, Chih., México.

Noviembre 2019



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
**CHIHUAHUA**

14 de noviembre de 2019

**ING. JOSÉ MARÍA ZEPEDA HERNÁNDEZ**

Presente

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Dra. Daphne Espejel García** para que lo desarrolle como tesis, con el título: **“APLICACIÓN DE HDM-4 PARA LA EVALUACIÓN DE PROYECTOS DE MEJORA Y NUEVA CONSTRUCCIÓN”**.

### **Índice**

#### **Introducción**

#### **Capítulo 1. Antecedentes**

- 1.1 Infraestructura carretera en México
- 1.2 Problemática de desarrollo y conservación de la infraestructura
- 1.3 Inversiones federales de la conservación de la infraestructura
- 1.4 Asociaciones público-privadas
- 1.5 Modelos de participación público-privadas
- 1.6 Proceso de selección e implementación de las APP
- 1.7 Factibilidad de los proyectos carreteros y análisis costo-beneficio con HDM-4
- 1.8 Uso de HDM-4 en el mundo
- 1.9 Uso de HDM-4 en México
- 1.10 Aplicación de la implementación de los CPCC
- 1.11 Falta de experiencia en la evaluación de proyectos de mejora y nueva construcción

#### **Capítulo 2. Descripción General**

- 2.1 Objetivos del desarrollo de HDM-4
- 2.2 El papel de HDM-4 en la gestión de carreteras
- 2.3 El ciclo de gestión
- 2.4 Estructura general de HDM-4
- 2.5 Aplicación de HDM-4
- 2.6 Datos de entrada
- 2.7 Análisis del ciclo de vía
- 2.8 Programa plurianual
- 2.9 Resultados de HDM-4
- 2.10 Aplicación de las herramientas de HDM-4



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
CHIHUAHUA

**Capítulo 3. Uso de estándares de mejora y nueva construcción en análisis de estrategias y programas**

- 3.1 Ejemplo de análisis de programas
- 3.2 Datos de configuración para el análisis de programas
- 3.3 Red de carreteras y flota vehicular
- 3.4 Definición del análisis
- 3.5 Estándares de trabajo y alternativas
- 3.6 Procedimiento para ejecutar la corrida
- 3.7 Resultados y análisis de los informes generados por HDM-4
- 3.8 Resumen de indicadores económicos
- 3.9 Conclusiones
- 3.10 Realización de un ejemplo de análisis y estrategias
- 3.11 Configuración de HDM-4 para un análisis de estrategia
- 3.12 Datos del Análisis
- 3.13 Estándares de trabajo
- 3.14 Estándares de mejora
- 3.15 Ejecución del análisis
- 3.16 Resultados y análisis de las informes generados por HDM-4
- 3.17 Conclusiones del uso de estándares de mejora y nueva construcción en análisis de estrategias y programas

**Capítulo 4. Estudio de caso: Análisis del ciclo de vida de un proyecto de reconstrucción**

**Capítulo 5. Estudio de caso: Evaluación de un proyecto de mejora con alternativas de ampliación parcial o adición de dos carriles**

**Capítulo 6. Estudio de caso: Evaluación de un proyecto de nueva construcción (libramiento)**

**Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones**

**Bibliografía**

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

**ATENTAMENTE**  
*"Naturam subiecit aliis"*

EL DIRECTOR

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
UAOH.



DIRECCIÓN

EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN  
Y POSGRADO

ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA  
Circuito No.1, Campus Universitario 2  
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125  
Tel. (614) 442-95-00  
[www.fing.uach.mx](http://www.fing.uach.mx)

## **Dedicatoria**

*Por sus huellas que siempre guiaron mi camino.*

*A Dios*

*Por permitirme vivir experiencias buenas, malas y maravillosas haciendo cada una de ellas un aprendizaje de vida permitiéndome crecer como profesionalista y ser humano.*

*A mi madre María de los Ángeles*

*Por haberme apoyado en todo momento, por el valor y la fuerza que siempre mostraste para seguir adelante y tu amor incondicional.*

*A mi padre Francisco Zepeda y mi hermano Darío Zepeda*

*Aunque ya no están físicamente conmigo, han estado siempre cuidándome y guiándome desde el cielo.*

*A mi pareja Angelica Angulo por su alegría y amor que durante estos años de carrera ha sabido apoyarme para continuar y nunca renunciar.*

*A mis profesores y amigos el M.I. Ricardo Solorio Murillo y Roberto Israel Hernández Domínguez por su tiempo y apoyo, así como por la sabiduría transmitida en el desarrollo de mi formación profesional*

## Contenido

<b>Introducción.</b>	1
<b>Capítulo 1 Antecedentes.</b>	3
1.1 Infraestructura carretera en México.	3
1.2 Problemática de desarrollo y conservación de la infraestructura.	5
1.3 Inversiones federales de la conservación de la infraestructura.	6
1.4 Asociaciones público-privadas.	7
1.5 Modelos de participación publico privadas.	8
1.6 Proceso de selección e implementación de las APP.	11
1.7 Factibilidad de los proyectos carreteros y análisis costo beneficio con HDM-4.	12
1.8 Uso de HDM-4 en el mundo.	14
1.9 Uso de HDM-4 en México.	15
1.10 Aplicación de la implementación de los CPCC.	16
1.11 Falta de experiencia en la evaluación de proyectos de mejora y nueva construcción.	17
<b>Capítulo 2 Descripción General.</b>	19
2.1 Objetivos del desarrollo de HDM-4.	19
2.2 El papel de HDM-4 en la gestión de carreteras.	19
2.3 El ciclo de gestión.	21
2.4 Estructura general de HDM-4.	22
2.5 Aplicación de HDM-4.	23
2.6 Datos de entrada.	25
2.7 Análisis del ciclo de vía.	26
2.8 Programa plurianual.	27
2.9 Resultados de HDM-4.	28
2.10 Aplicación de las herramientas de HDM-4.	30
<b>Capítulo 3 Uso de estándares de mejora y nueva construcción en análisis de estrategias y programas.</b>	31
3.1 Ejemplo de análisis de programas.	32
3.2 Datos de configuración para el análisis de programas.	33
3.3 Red de carreteras y flota vehicular.	35
3.4 Definición del análisis.	37
3.5 Estándares de trabajo y alternativas.	38

3.6 Procedimiento para ejecutar la corrida. ....	40
3.7 Resultados y análisis de los informes generados por HDM-4. ....	43
3.8 Resumen de indicadores económicos. ....	52
3.9 Conclusiones. ....	54
3.10 Realización de un ejemplo de análisis y estrategias. ....	55
3.11 Configuración de HDM-4 para un análisis de estrategia. ....	56
3.12 Datos del Análisis. ....	58
3.13 Estándares de trabajo. ....	61
3.14 Estándares de mejora. ....	62
3.15 Ejecución del análisis. ....	64
3.16 Resultados y análisis de las informes generados por HDM-4. ....	65
3.17 Conclusiones del uso de estándares de mejora y nueva construcción en análisis de estrategias y programas. ....	80
<b>Capítulo 4 Estudio de caso: Análisis del ciclo de vida de un proyecto de reconstrucción.</b> ....	81
4.1 Descripción y detalles del proyecto. ....	82
4.2 Configuración de HDM-4. ....	84
4.3 Datos de análisis. ....	86
4.4 Estándares de trabajo. ....	89
4.5 Configurar ejecución del análisis y ejecutar corrida. ....	91
4.6 Resultados del análisis del proyecto de modernización del libramiento. ....	91
4.7 Conclusiones del análisis del ciclo de vida de un proyecto de reconstrucción. ....	97
<b>Capítulo 5 Estudio de caso: Evaluación de un proyecto de mejora con alternativas de ampliación parcial o adición de dos carriles.</b> ....	99
5.1 Introducción. ....	99
5.2 Descripción y detalles del proyecto. ....	99
5.3 Configuración de HDM-4. ....	101
5.4 Datos del análisis. ....	101
5.5 Descripción y detalles del proyecto. ....	103
5.6 Procedimiento de evaluación y ejecución de la corrida. ....	106
5.7 Resultados de la evaluación económica. ....	108
5.8 Conclusiones de la evaluación de un proyecto de mejora con alternativas de ampliación parcial o adición de dos carriles. ....	114

<b>Capítulo 6 Estudio de caso: Evaluación de un proyecto de nueva construcción (libramiento).</b>	117
6.1 Descripción y detalles del proyecto.	118
6.2 Configuración de HDM-4 para un análisis de estrategia.	118
6.3 Datos del análisis.	120
6.4 Estantales de trabajo.	121
6.5 Configurar ejecución del análisis y ejecutar corrida.	123
6.6 Resultados del análisis del proyecto libramiento.	124
6.7 Conclusiones de la evaluación de un proyecto de nueva construcción (libramiento).	132
<b>Capítulo 7 Conclusiones y recomendaciones.</b>	133
<b>Bibliografía.</b>	134

## Índice de Tablas

### Capítulo 1

Tabla 1.1 Programa nacional de infraestructura 2007-2012. ....	4
--	---

### Capítulo 2

Tabla 2.1 Análisis de ciclo de vida usando HDM-4. ....	29
--	----

### Capítulo 3

Tabla 3.1 Características de la red carretera. ....	35
---	----

Tabla 3.2 Contenido de información para cada tramo. ....	36
--	----

Tabla 3.3 Clasificación vehicular para los diez tramos (Análisis programas). ....	37
---	----

Tabla 3.4 Alternativas utilizadas en la evaluación de las secciones o tramos. ....	39
--	----

Tabla 3.5 Optimización del presupuesto por escenario presupuestal. ....	41
---	----

Tabla 3.6 Escenario presupuestal sin restricciones (Análisis de programas). ....	44
--	----

Tabla 3.7 Escenario presupuestal medio (Análisis de programas). ....	45
--	----

Tabla 3.8 Escenario presupuestal bajo (Análisis de programas). ....	46
---	----

Tabla 3.9 Listada de los trabajos por año (Análisis de programas). ....	48
---	----

Tabla 3.10 Listado de los trabajos por cada uno de los tramos (Análisis de programas). ...	49
--	----

Tabla 3.11 Análisis técnico-económico por escenario presupuestario. ....	52
--	----

Tabla 3.12 Análisis económico por tipo de alternativa. ....	52
---	----

Tabla 3.13 Indicador económico VPN/CAP de la alternativa base. ....	53
---	----

Tabla 3.14 Indicador económico VPN/CAP alternativa para ampliación a 3 carriles. ....	53
---	----

Tabla 3.15 Indicador económico VPN/CAP alternativa para ampliación a 4 carriles. ...	53
--	----

Tabla 3.16 Resultados de la evaluación técnico – económica (análisis de programas). ...	54
---	----

Tabla 3.17 Estándares de conservación (Análisis de estrategias). ....	62
---	----

Tabla 3.18 Estándar de mejora (Análisis de estrategias). ....	62
---	----

Tabla 3.19 Alternativas utilizadas en la evaluación de la red carretera. ....	62
---	----

Tabla 3.20 Escenarios presupuestarios propuestos. ....	65
--	----

Tabla 3.21 Escenario presupuestal sin restricciones (Análisis de estrategias). ....	67
---	----

Tabla 3.22 Escenario presupuestal medio (Análisis de estrategias). ....	69
---	----

Tabla 3.23 Escenario presupuestal bajo (Análisis de estrategias). ....	71
--	----

Tabla 3.24 Indicadores económicos para el tramo T1R2W1. ....	73
--	----

Tabla 3.25 Indicadores económicos para el tramo T4R5W2. ....	74
--	----

Tabla 3.26 Trabajos para un escenario presupuestal alto. ....	76
---	----

Tabla 3.27 Trabajos para un escenario presupuestal bajo. ....	77
Tabla 3.28 Comparación del comportamiento de la irregularidad promedio por escenario presupuestal. ....	78
Tabla 3.29 Comparativa del área dañada promedio por escenario presupuestal. ....	79
Tabla 3.30 Comparativa entre los escenarios presupuestales. ....	80
Tabla 3.31 Resultados de la evaluación técnico – económica (Análisis de estrategias). ....	80

#### **Capítulo 4**

Tabla 4.1 Datos de pavimento para el análisis con HDM-4 de la opción de pavimento de concreto hidráulico. ....	83
Tabla 4.2 Datos de pavimento para el análisis con HDM-4 de la opción de pavimento asfáltico. ....	84
Tabla 4.3 Características de la zona climática utilizada en HDM-4. ....	85
Tabla 4.4 Datos del juego de calibración para concreto hidráulico. ....	86
Tabla 4.5 Insumos de la flota vehicular. ....	87
Tabla 4.6 Segmentos homogéneos obtenidos del Sistema de Gestión de Pavimentos. ....	88
Tabla 4.7 Denominaciones de los estándares de conservación definidos para el análisis. ..	89
Tabla 4.8 Estándar EC1A - Mantenimiento de rutina (asfalto). ....	89
Tabla 4.9 Estándar EC2A - Microcarpeta, reposición carpeta, reconstrucción (asfalto). ...	90
Tabla 4.10 Estándar EC1C - Mantenimiento de rutina (concreto). ....	90
Tabla 4.11 Estándar EC2C - Reposición del sello, reposición de losas, fresado (concreto). 90	
Tabla 4.12 Análisis costo/beneficio (Concreto, Asfalto) TDPA 6567 veh/día. ....	92
Tabla 4.13 Ej Análisis costo/beneficio (Concreto, Asfalto) TDPA 9998 veh/día. ....	94
Tabla 4.14 Análisis técnico - económico para las tres alternativas implementadas. ....	97

#### **Capítulo 5**

Tabla 5.1 Geometría del tramo (Proyecto ampliación). ....	100
Tabla 5.2 Condición del pavimento existente. ....	100
Tabla 5.3 Configuraciones dentro de HDM-4 (Proyecto ampliación). ....	101
Tabla 5.4 Flota vehicular empleada en el estudio (Proyecto ampliación). ....	102
Tabla 5.5 Resumen de costos unitarios de insumos de los vehículos. ....	102
Tabla 5.6 Tramo utilizada en HDM-4 para la evaluación de las ampliaciones. ....	103
Tabla 5.7 Denominaciones de los estándares de conservación y mejora. ....	104
Tabla 5.8 Estándar (Conservación) CReCa7 Conservación +Recuperación y Carpeta. ...	104
Tabla 5.9 Estándar (Mejora) Amp-1 Ensanchamiento parcial de 1 metro. ....	105

Tabla 5.10 Estándar (Mejora) Amp-3 Ensanchamiento parcial de 3 metros. ....	105
Tabla 5.11 Estándar (Mejora) Adic2c Adición de dos carriles. ....	105
Tabla 5.12 Resumen de trabajos alternativa base. ....	110
Tabla 5.13 Resumen de trabajos alternativa ampliación a dos carriles. ....	111
Tabla 5.14 Resumen de indicadores económicos para la alternativa base y libramiento. ..	113
Tabla 5.15 Comparación de resultados (Proyecto ampliación). ....	115

## **Capítulo 6**

Tabla 6.1 Configuración de los tramos utilizados en HDM-4. ....	120
Tabla 6.2 Flota vehicular representativa utilizada en HDM-4. ....	120
Tabla 6.3 Descripción del estándar de conservación definido para el análisis. ....	121
Tabla 6.4 Estándar CReCa7 Recuperación y carpe de 7cm (Asfalto). ....	122
Tabla 6.5 Resumen de trabajos (Alternativa base). ....	128
Tabla 6.6 Resumen de los trabajos (Alternativa Libramiento). ....	129
Tabla 6.7 Resumen de indicadores económicos para la alternativa base y libramiento. ...	131
Tabla 6.8 Comparación de resultados (Proyecto Libramiento). ....	132

## **Capítulo 7**

## Índice de Ilustraciones

### Capítulo 1

Ilustración 1.1 Infraestructura carretera en el 2006. ....	3
Ilustración 1.2 Infraestructura carretera para el 2012. ....	4
Ilustración 1.3 Distribución del programa carretero 2007-2012. ....	7
Ilustración 1.4 Asociaciones Publico-Privadas para el Desarrollo Carretero de México. ...	11
Ilustración 1.5 Asociaciones Público-Privadas para el Desarrollo Carretero en México. ...	16

### Capítulo 2

Ilustración 2.1 Ciclo de gestión de carreteras. ....	21
Ilustración 2.2 Estructura general de HDM-4. ....	23

### Capítulo 3

Ilustración 3.1 Modelo de tránsito de flujo suburbano (Commuter). ....	33
Ilustración 3.2 Tipo de velocidad/capacidad (Two Lane Road). ....	34
Ilustración 3.3 Zona climática (Semiárido subtropical – cálido). ....	35
Ilustración 3.4 Ventana de HDM-4 para la definición de los detalles del programa. ....	38
Ilustración 3.5 Visualización de las alternativas aplicadas a los tramos en HDM-4. ....	40
Ilustración 3.6 Visualización en HDM-4 de los escenarios presupuestarios. ....	42
Ilustración 3.7 Resultado de alternativas para la optimización de los distintos escenarios presupuestales. ....	42
Ilustración 3.8 Resultados e informes generados por HDM-4. ....	43
Ilustración 3.9 Gráfica de la irregularidad promedio para la red de carreteras por escenario presupuestal. ....	47
Ilustración 3.10 Gráfica de la relación entre el volumen/capacidad promedio para un escenario presupuestal (Bajo). ....	50
Ilustración 3.11 Gráfica de la relación entre el volumen/capacidad promedio para un escenario presupuestal (Medio). ....	51
Ilustración 3.12 Gráfica de la relación entre el volumen/capacidad promedio para un escenario presupuestal (Alto). ....	51
Ilustración 3.13 Histograma de distribución de los datos de flujo (MP Flow). ....	57
Ilustración 3.14 Zona climática utilizada para el análisis (MP climate). ....	58
Ilustración 3.15 Juego de calibración (Análisis de estrategias). ....	58
Ilustración 3.16 Flota vehicular representativa (Análisis de estrategias). ....	59
Ilustración 3.17 Ventana de HDM-4 para la definición de los detalles del programa. ....	59
Ilustración 3.18 Tramos o red carretera representativa para la ejecución de la corrida. ....	60

Ilustración 3.19 Visualización en HDM-4 de los escenarios presupuestarios. ....	64
Ilustración 3.20 Resultado de alternativas para la optimización de los distintos escenarios presupuestales. ....	65
Ilustración 3.21 Resultados e informes generados por HDM-4 (Análisis de estrategias y programas. ....	66
Ilustración 3.22 Gráfica de la irregularidad promedio para el tramo T1R1W1. ....	74
Ilustración 3.23 Gráfica de la irregularidad promedio para el tramo T1R2W3. ....	75
Ilustración 3.24 Gráfica de la irregularidad promedio para el tramo T1R4W1A. ....	75
Ilustración 3.25 Gráfica de la irregularidad promedio para la red de carreteras por escenario presupuestal. ....	78
Ilustración 3.26 Gráfica del área dañada promedio por escenario presupuestal. ....	79

#### **Capítulo 4**

Ilustración 4.1 Diseño para la alternativa de concreto hidráulico. ....	83
Ilustración 4.2 Diseño para la alternativa de pavimento asfáltico. ....	84
Ilustración 4.3 Gráfica comparativa de la irregularidad para las tres alternativas. ....	93
Ilustración 4.4 Gráfica comparativa de los costos de operación vehicular para las tres alternativas. ....	94
Ilustración 4.5 Gráfica comparativa de la irregularidad (IRI m/km). ....	95
Ilustración 4.6 Gráfica comparativa de los costos de operación vehicular (COV). ....	96

#### **Capítulo 5**

Ilustración 5.1 Visualización de los estándares aplicados a los tramos en HDM-4. ....	105
Ilustración 5.2 Ventana de HDM-4 para la definición de los detalles del programa. ....	106
Ilustración 5.3 Inicio del análisis (Proyecto de ampliación). ....	107
Ilustración 5.4 Gráfica de la irregularidad promedio en (m/km) para el proyecto. ....	109
Ilustración 5.5 Gráfica de la velocidad promedio de los vehículos en (km/h) (Alternativa base). ....	112
Ilustración 5.6 Gráfica de la velocidad promedio de los vehículos en (km/h) (Ampliación a dos carriles). ....	112
Ilustración 5.7 Gráfica de la relación entre el volumen/capacidad promedio para el tramo homogéneo. ....	113

#### **Capítulo 6**

Ilustración 6.1 Proyectos del programa carretero 2007-2012 por subprogramas.. ....	117
Ilustración 6.2 Esquema de la conformación de los tramos y el libramiento. ....	118
Ilustración 6.3 Modelo de tránsito (Commuter). ....	119

Ilustración 6.4 Modelo de tránsito (Free Flow).	119
Ilustración 6.5 Zona climática utilizada para el análisis (Subtropical cálido-subhúmedo).	119
Ilustración 6.6 Ventana de HDM-4 para la definición de los detalles del programa..	121
Ilustración 6.7 Visualización de las alternativas aplicadas a los tramos en HDM-4.	122
Ilustración 6.8 Configuración de la ejecución del análisis (Proyecto libramiento).	123
Ilustración 6.9 Resultados e informes generados por HDM-4.	124
Ilustración 6.10 Gráfica de la irregularidad promedio en (m/km) para el Tramo A.	125
Ilustración 6.11 Gráfica de la irregularidad promedio en (m/km) para el Tramo B.	126
Ilustración 6.12 Gráfica de la irregularidad promedio (Proyecto libramiento).	130
Ilustración 6.13 Gráfica de la velocidad promedio de los vehículos en (km/h) para el Tramo A con la alternativa base.	130
Ilustración 6.14 Gráfica de la velocidad promedio de los vehículos en (km/h) para el Tramo A con la alternativa del libramiento.	130
Ilustración 6.15 Gráfica de la velocidad promedio de los vehículos en (km/h) para el Tramo C (Libramiento).	131

## Capítulo 7



## Introducción

Las carreteras en México son muy importantes para el desarrollo social y económico debido a que constituyen la principal vía de desplazamiento para personas y de transporte de bienes.

El constante crecimiento demográfico del país da lugar a problemas que requieren solución donde la situación actual muestra un rezago importante en lo que respecta al estado y cobertura de la red carretera federal por lo que se requiere mejorar su conservación y promover su expansión. Por tales motivos es más que evidente la necesidad de hacer una correcta planeación de la conservación, construcción y mejoramiento de las vías terrestres por parte de las autoridades correspondientes

En resumen, nuestro país padece de una falta de infraestructura suficiente y moderna, debido a que cada día existe un crecimiento, es de suma importancia impulsar el desarrollo económico, con la modernización, ampliación, reconstrucción y conservación de la infraestructura existente.

La evaluación de este tipo de proyectos se origina a raíz del crecimiento poblacional, que incrementa los volúmenes de tránsito vehicular, el cual afecta a los usuarios de estas vías incrementando el tiempo de recorrido. Al mismo tiempo, debido a las cargas transmitidas por los vehículos pesados se generan daños a la superficie de rodamiento incrementando los costos de operación vehicular, lo que se convierte en un problema, ya que el camino existente no satisface las necesidades de los usuarios.

Cuando una vialidad deja de cumplir con los niveles de servicio para los que fue diseñada, es necesario buscar opciones que solucionen de manera óptima las necesidades de los usuarios. Esto obliga en ocasiones a diseñar nuevos caminos o ampliar, modernizar y reconstruir caminos existentes para obtener mayores beneficios.

Hasta ahora, en nuestro país, los sistemas de gestión de pavimentos se han aplicado mayormente a la conservación de los caminos existentes, esto con el fin de favorecer el desarrollo de las actividades comerciales e industriales a través del transporte carretero que debe desenvolverse en un entorno confortable en condiciones seguras reduciendo al mínimo sus costos de operación vehicular.

Como país en vías de desarrollo y con presupuestos de inversión relativamente limitados, el gobierno de México tiene la necesidad de diseñar planes y programas realistas con base en los cuales se apliquen de mejor modo posible esos recursos. El gobierno federal ha venido optimizando los recursos que se asignan al desarrollo de la red carretera con la creación de modelos de participación público-privada y la implementación de herramientas para la planeación como lo es el sistema HDM-4 (Highway Development Management).

El propósito de esta investigación es exponer las herramientas de HDM-4 para la evaluación de proyectos de mejora y nueva construcción, además presentar tres estudios de caso como ejemplo del tipo de ejercicios que se pueden analizar en HDM-4.

El primer capítulo expone la situación actual de la infraestructura carretera donde se mencionan los modelos de participación público-privada, el uso de HDM-4 en México y la implementación de contratos plurianuales de conservación de carreteras para la red federal libre de peaje.



El segundo capítulo contiene una descripción general del HDM-4 y su aplicación en la gestión de carreteras, la entrada de datos, análisis del ciclo de vida y la salida de datos para el posterior análisis de estos.

Posterior al reconocimiento de las herramientas del software HDM-4, el tercer capítulo se enfoca en el uso de estándares de mejora y nueva construcción en análisis de programas y estrategias, desarrollando dos ejemplos, basados en los estudios de caso que acompañan al software, cuya aplicación es muy variada y de interés para las administraciones de carreteras como la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT).

El cuarto capítulo trata sobre un estudio de caso enfocado al análisis económico de un proyecto para mejorar una carretera de concreto hidráulico con problemas de deterioro, para la cual se le proponen tres alternativas: conservación rutinaria, reconstrucción con una nueva capa de concreto hidráulico y reconstrucción con pavimento de concreto asfáltico. La evaluación de este proyecto se llevó a cabo con ayuda de HDM-4, sin embargo, al tratarse de la reconstrucción o modernización de un pavimento de concreto, el software carece de una opción que permitiera evaluar este tipo de pavimentos, lo que llevó a resolverlo de forma externa.

En el quinto capítulo se analiza un proyecto en el cual se tienen problemas de capacidad con volúmenes altos de tránsito y un solo carril por sentido. La viabilidad económica del proyecto se evalúa mediante la comparación de la alternativa base (conservación rutinaria y periódica) y los estándares de mejora propuestos consistentes en ampliaciones parciales de uno y tres metros o la adición de un carril.

El análisis de un proyecto para la factibilidad técnico-económico de un libramiento se ve en el capítulo sexto; la evaluación es un modelo simplificado de un libramiento que consiste en desviar el tránsito vehicular a través de una ruta en la cual no sea necesario cruzar a través de una ciudad evitando así tiempo de recorrido y congestión generando así los ahorros por costos de operación vehicular haciendo factible este tipo de proyectos. Por último, se presentan las conclusiones sobre los temas analizados en este trabajo y una serie de recomendaciones sobre los beneficios encontrados en la implementación del software HDM-4 para la planeación de obras en las carreteras mexicanas.

# Capítulo 1 Antecedentes

## 1.1 Infraestructura carretera en México

La infraestructura carretera es un elemento de suma importancia como detonante indispensable para el crecimiento, la competitividad y la integración social de un país. Para México es necesario el desarrollo de programas que incentiven a la mejora y nueva construcción de la infraestructura y con esto buscar ampliar la cobertura, mejorar la calidad y el estado físico, obteniendo como resultados mayor seguridad a los usuarios, tiempos de recorrido menores y una mayor comodidad, originando importantes beneficios para los usuarios, lo que se deriva en efectos favorables para la economía y el bienestar social.

Es conveniente mejorar y desarrollar nueva infraestructura carretera, ya que es uno de los componentes más importantes para el desarrollo económico y social de un país. En México la infraestructura carretera está constituida por 15 ejes troncales que corren principalmente en sentido longitudinal como se puede percibir en la siguiente imagen, en la cual se muestra el estado de esos ejes al principio de la presente administración.

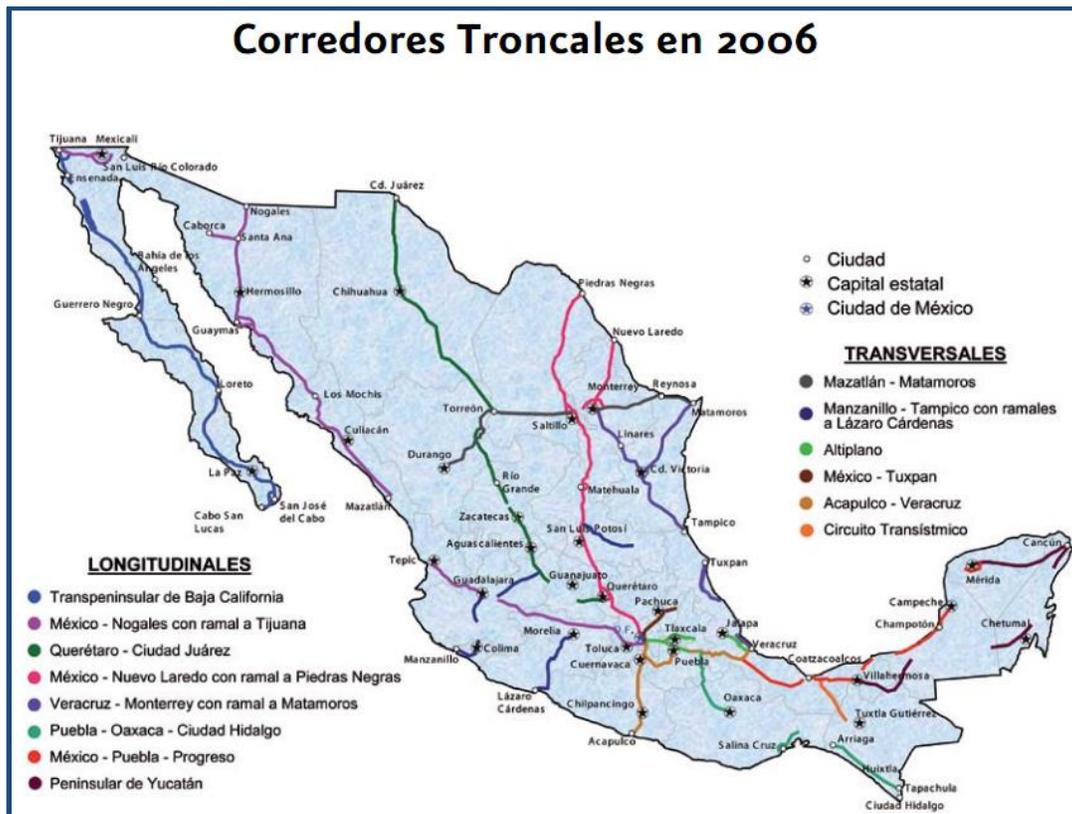


Ilustración 1-1 Infraestructura carretera en el 2006 (Presidencia, 2007)

El programa nacional de infraestructura carretera 2007-2012 pretendió construir o modernizar 17,598 kilómetros de carreteras y caminos rurales, incluyendo 12,260 kilómetros que corresponden a la terminación de 100 proyectos carreteros completos, como se indica en la siguiente tabla. Con estos proyectos se previó complementar los corredores troncales para llegar en 2012 a la situación mostrada en la Ilustración 1.2.

Tabla 1.1 Programa nacional de infraestructura 2007-2012 (**Presidencia, 2007**)

Infraestructura Carretera	Kilómetros
Corredores troncales	5,472
Fuera de corredores	6,788
Obras complementarias	1,338
Caminos rurales y carreteras alimentadoras	4,000



Ilustración 1-2 Infraestructura carretera para el 2012 (**Presidencia, 2007**)

La infraestructura carretera propicia la creación de cadenas productivas generadas por el tráfico de mercancías e impulsan el comercio y la producción determinando los costos de acceso a los mercados, tanto de productos como de insumos. Asimismo, facilitan el acceso a servicios básicos en beneficio de población y de las actividades productivas, siendo así un componente esencial de la estrategia para la integración regional y el desarrollo social equilibrado, así como para incrementar la competitividad de la economía nacional. Por tales



motivos es más que evidente la importancia de la correcta planeación en el mejoramiento y la nueva construcción de las vías terrestres por parte de las autoridades correspondientes.

En la actualidad, México cuenta con un importante patrimonio vial que se clasifica de la siguiente manera:

- Red federal.
- Red alimentadora.
- Red rural.

La red federal de carreteras está a cargo de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), mientras que los caminos de la red alimentadora son responsabilidad de los gobiernos de los estados.

La red carretera nacional tiene una extensión de 356,945 km., de los cuales 48,319 km. pertenecen a la red federal; 72,179 km. a las redes de jurisdicción estatal y 236,447 a caminos rurales y alimentadoras. (DGDC, 2009). Todos los caminos de la red federal son pavimentados, lo mismo que la mayoría de los que componen las redes estatales. En cambio, la mayoría de los caminos rurales y alimentadores corresponden a caminos no pavimentados.

La red federal se divide en básica y secundaria. En la red básica se ubican los 14 corredores troncales con una longitud total de 19,245 km. a lo largo de los cuales circula la mayoría del tránsito carretero.

Asimismo, en la red federal básica operan 7,216 km. de autopistas de cuota. Esta red de cuota está concesionada a particulares, Gobiernos Estatales o instituciones financieras. Por lo que corresponde a la red federal secundaria, esta se compone de 17,172 kilómetros que cubren las diferentes regiones del país. (DGDC, 2009)

## **1.2 Problemática de desarrollo y conservación de la infraestructura**

La red carretera mexicana presenta necesidades de inversión en construcción, conservación, modernización y ampliación de carreteras, que permitan atender carreteras federales, carreteras alimentadoras, caminos rurales y autopistas de cuota. Los montos de inversión en México son relativamente bajos en infraestructura, ya que son de alrededor de 2% del Producto Interno Bruto (PIB); en comparación con Chile que invierte más del doble, mientras que China destina un 9% del PIB. (Presidencia, 2006). En el mundo las principales, y casi únicas, fuentes de recursos para financiar inversiones carreteras han sido tradicionalmente las siguientes:

- El presupuesto general del estado, aplicado en sus diferentes niveles territoriales.
- Los peajes que se cobran en las autopistas de cuota.
- Un sobreprecio a los combustibles que aplica como cargo a los usuarios de las carreteras.

Los recursos de inversión necesarios para construir carreteras nuevas, ampliar la capacidad de las existentes, conservar en buenas condiciones físicas los tramos en servicio y extender su cobertura a todo el país, superaran, con mucho, a los que se pueden obtener de recursos fiscales en presupuestos federales anuales.



Lo anterior, ha obligado a la SCT a desplegar esfuerzos sistemáticos para diseñar e identificar nuevas fuentes de recursos de inversión y aumentar los montos disponibles para desarrollar los nuevos proyectos carreteros que demanda el país.

### **1.3 Inversiones federales de la conservación y desarrollo de la infraestructura**

En el año 2007 la Secretaría de Comunicaciones y Transporte dio a conocer el PROGRAMA CARRETERO 2007-2012 ya citado y sus 100 proyectos estratégicos, cuyos objetivos son de:

- Aumentar la competitividad de la economía.
- Contribuir a eliminar desequilibrios regionales.
- Extender la comunicación y eliminar el aislamiento de las comunidades rurales.
- Generar empleos directos e indirectos bien remunerados.
- Impulsar el potencial de desarrollo nacional y regional.

Este programa, a su vez, está constituido por los siguientes subprogramas:

- Conservación de la red federal de carreteras: Para preservación del patrimonio vial.
- Modernización estratégica de la red: Para ampliar y construir tramos de altas especificaciones, sobre todo en corredores.
- Libramientos y accesos. Para mejorar la conectividad de y hacia las principales ciudades, puertos, fronteras y centros turísticos.
- Carreteras interestatales: Para integrar ejes interregionales y mejorar la comunicación en regiones con potencial desarrollo.
- Obras complementarias federales: Para eliminar cruces conflictivos, mejorar pequeños tramos y atender problemas locales.
- Caminos rurales y alimentadores: Para dar acceso a comunidades aisladas. (SCT, 2007)

Lo anterior contiene una componente muy importante relacionada con el desarrollo de la infraestructura, sin embargo, en los últimos años la aplicación del HDM-4 se ha enfocado principalmente en la conservación de la infraestructura carretera existente, dejando de lado las herramientas contenidas en HDM-4 para el análisis de proyectos de mejora y nueva construcción que podrían aplicarse en los subprogramas de modernización y libramientos y accesos.

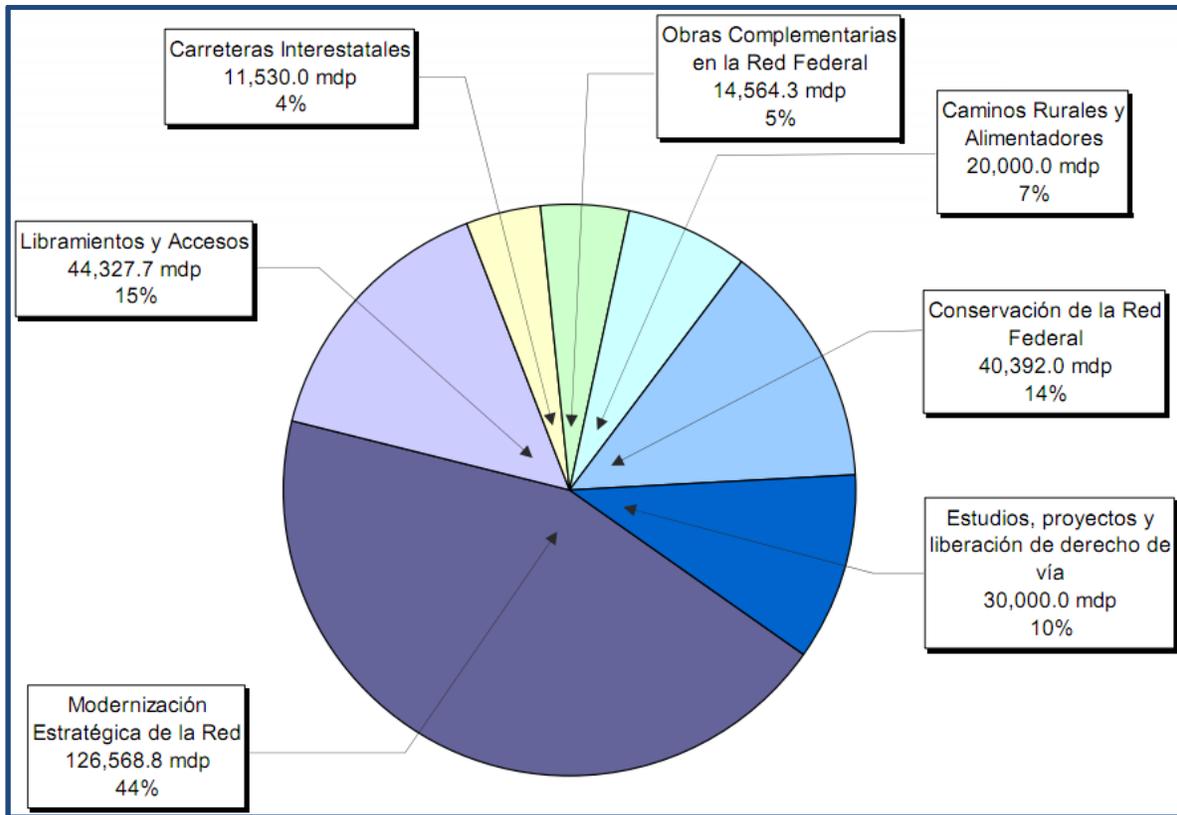


Ilustración 1-3 Distribución del programa carretero 2007-2012 (SCT, 2007)

En la gráfica se pueden observar los porcentajes de cada subprograma del total de la infraestructura carretera a desarrollar, donde la suma de libramientos y accesos en conjunto con la modernización da como resultado el 59% del total del programa carretero. De ahí la importancia que se tiene utilizar el software de HDM-4 en la evaluación de factibilidad de este conjunto de proyectos.

#### 1.4 Asociaciones público - privadas

En un número cada vez mayor de países se han creado asociaciones público-privadas (APP) para promover la oferta de activos y servicios de infraestructura por parte del sector privado. Las experiencias acumuladas en diferentes países parecen indicar que la infraestructura económica (por ejemplo, el transporte) es generalmente un ámbito más propicio para la creación de este tipo de asociaciones que la infraestructura social (por ejemplo, la atención de la salud y la educación) por tres razones principales.

Primero, los proyectos sólidos encaminados a resolver limitaciones evidentes de la infraestructura como carreteras, ferrocarriles, puertos y electricidad; probablemente tengan altas tasas de rentabilidad económica y por ello resulten atractivos para el sector privado. Segundo, a menudo el cobro de tarifas a los usuarios resulta más factible y además más conveniente en los proyectos de infraestructura económica. Tercero, por lo general los proyectos de infraestructura económica cuentan con un mercado más desarrollado para cambiar la construcción con la prestación de servicios conexos (por ejemplo, la construcción, la explotación y mantenimiento de una carretera de peaje) que los proyectos de



infraestructura social. Habida cuenta de estas consideraciones, no es de sorprender que las asociaciones público-privadas se utilicen en forma preponderante para la infraestructura vial, como sucede en varios países.

En general, las APP permiten al gobierno evitar o diferir el gasto en infraestructura sin renunciar a sus beneficios. Esta puede ser una ventaja especialmente atractiva para los gobiernos cuya capacidad actual de gasto se encuentra restringida pero que están relativamente libres de restricciones para comprometer gastos futuros. De ahí que, si bien las APP pueden atenuar las restricciones fiscales que limitan la inversión en infraestructura, también pueden ser utilizadas para eludir los controles sobre gastos y trasladar la inversión pública fuera del presupuesto y la deuda fuera del balance del gobierno. Cuando esto sucede, el estado puede tener que soportar la mayor parte del riesgo que entrañen las APP y quizás enfrentar considerables costos fiscales en el mediano y largo plazo (Akitoby, Hemming, & Schwartz, 2007).

No obstante, las APP bien estructuradas e implementadas ofrecen la posibilidad de lograr una mayor eficiencia en la construcción de activos de infraestructura y la prestación de los servicios conexos y, por lo tanto, también reducen los costos del estado cuando brinda dichos servicios.

***¿Qué pueden hacer los gobiernos para garantizar que las APP suministren de manera eficiente servicios de infraestructura de alta calidad?***

Para garantizar que las APP suministren de manera eficiente servicios de infraestructura de alta calidad, los gobiernos deben definir con claridad (Akitoby, Hemming, & Schwartz, 2007):

- a) El marco jurídico que rige a las APP.
- b) Los procesos para seleccionar e implementar las APP, así como la función que desempeña el ministerio de hacienda en este contexto
- c) Las obligaciones contractuales en las que se basan las APP y que determinan directamente el riesgo fiscal en que incurre el estado.

Además, los gobiernos deberían tener como objetivo la transparencia de la contabilidad fiscal, una divulgación amplia y completa de todos los riesgos fiscales.

Las necesidades de infraestructura y las restricciones de financiamiento son más graves en los países en desarrollo que en las economías avanzadas, en toda economía es preciso mantener la disciplina fiscal y respetar los límites en materia de impuestos y endeudamiento, que constituyen las fuentes habituales de financiamiento para la inversión pública.

## **1.5 Modelos de participación público-privada**

Como ya se ha mencionado, el sistema carretero mexicano tiene una longitud de más de 357 mil kilómetros en el que convergen numerosas necesidades entre las que destacan la modernización y expansión de la red carretera. Para atender estas necesidades México requiere unos 60,000 millones de pesos anuales.

A pesar del importante aumento de los presupuestos de carreteras, cada año el gobierno federal invierte menos de lo requerido para atender las necesidades de la red. Para cerrar esta brecha, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) ha diseñado tres modelos de



participación público-privada para atraer capitales privados a la inversión en carreteras (DGDC, 2011).

Los tres modelos son:

- Concesiones.
- Aprovechamiento de activos.
- Proyecto de Prestación de Servicios (PPS)

A través de estos modelos, la SCT busca:

- Adelantar el desarrollo de infraestructura carretera tanto de cuota como libre.
- Incrementar los montos de inversión en carreteras con la participación del sector privado.
- Elevar la calidad del servicio ofrecido a los usuarios.
- Aumentar la eficiencia y productividad en la prestación de servicios públicos.
- Mejorar la distribución y administración de los riesgos de los proyectos carreteros.
- Abrir nuevos espacios de participación para la iniciativa privada.

### **1.5.1 Modelo de concesiones**

Características generales:

- Concesiones otorgadas mediante licitación pública.
- SCT entrega a los concursantes el proyecto ejecutivo y el derecho de vía liberado
- SCT entrega a los licitantes un estudio de aforo, pero no asume responsabilidad alguna por las variaciones resultantes.
- SCT fija tarifas medias máximas y la regla para su actualización.
- El plazo de concesión es hasta el máximo permitido por la ley (treinta años).
- El gobierno efectúa una aportación inicial con recursos públicos, a través del Fondo Nacional de Infraestructura (FNI).
- La concesión se otorga al licitante que solicite el menor apoyo económico del gobierno, medido como la suma de la aportación inicial y del valor presente neto del compromiso de aportación subordinada.
- El gobierno puede efectuar una subdivisión con recursos públicos, a través del Fondo Nacional de Infraestructura (FNI), o bien, recibir por parte del concesionario una contraprestación inicial por única vez.
- Cuando los proyectos no requieren recursos públicos, la concesión otorgará al licitante que cumpla con los requisitos legales, técnicos y financieros de la licitación y ofrezca la mayor contraprestación a la SCT.
- Distribución de riesgos en los temas de caso fortuito y fuerza mayor a través de seguros y de un fondo contingente establecido en el FNI.
- Posibilidad de resarcir al concesionario el capital invertido en caso de terminación anticipada de la concesión por causas imputables al propio concesionario.

Bajo este modelo se han otorgado 18 concesiones con una longitud de 1,306 kilómetros.



### **1.5.2 Modelo de proyectos de prestación de servicios**

Características generales:

- Concesión otorgada mediante licitación pública que asegura al concesionario el derecho de que se le adjudique el contrato de prestación de servicios.
- El plazo de contratación del servicio es fijo, de 15 a 30 años.
- El contrato establece una asociación entre la Secretaría y una empresa privada para diseñar, financiar, construir, mantener y operar una carretera.
- La prestación del servicio es realizada por la empresa privada a cambio de pagos periódicos trimestrales.
- El pago periódico se basa en un mecanismo que considera la disponibilidad de la vía y su nivel de uso.
- Cada licitante calcula un pago periódico en función de:
  - Costo de construcción, conservación y operación.
  - Rendimiento sobre el capital aportado (incluyendo costos financieros)
  - Tránsito anual estimado en una banda específica.
  - Periodo de contratación.
- El valor presente neto del flujo de pagos periódicos es la variable de decisión para el otorgamiento de la concesión, previa validación del cumplimiento de requisitos técnicos, legales y financieros.
- Una vez terminada la construcción, la carretera modernizada sigue operando como vía libre de peaje.
- Cuando el modelo se aplica a autopistas de cuota, el pago periódico se realiza mediante una combinación de tarifas y recursos presupuestales.

Bajo el modelo se han otorgado 7 concesiones con una longitud de 605 kilómetros

### **1.5.3 Modelo de aprovechamiento de activos**

Características generales:

El modelo plantea aprovechar 23 autopistas de cuota de la red del Fonadin para apoyar el desarrollo de 2,193.5 km de nueva infraestructura y consiste en lo siguiente (DGDC, 2009):

-SCT y SHCP acuerdan desincorporar activos carreteros del FNI a cambio del pago de una indemnización.

-SCT integra paquetes conformados por autopistas de la red FNI y por nuevas autopistas de cuota.

-SCT concede esos paquetes al sector privado mediante licitaciones públicas y obtiene una contraprestación con la que paga al FNI.

-El concesionario se hace responsable de operar, conservar y explotar los activos en cuestión, así como de construir y posteriormente explotar las nuevas autopistas que formen parte del paquete.

Bajo el modelo se han otorgado 3 paquetes con una longitud de 1,200 kilómetros.

## 1.6 Proceso de selección e implementación de las APP

En general, la decisión de emprender una APP debe adoptarse si está adecuadamente justificada, para lo cual se puede seguir un proceso de dos etapas. La primera etapa consiste en definir si es conveniente emprender un proyecto determinado, a partir de sólidos procedimientos de planeación de inversiones y evaluación de proyectos (por ejemplo, usando análisis costo-beneficio). Un paso importante en esta primera etapa es el de clasificar todos los proyectos por orden de importancia en función de su rentabilidad (económica o social) y decidir cuáles son asequibles desde el punto de vista fiscal y merecen emprenderse. La segunda etapa consiste en decidir si un proyecto que se estime conveniente debería encararse por medio del sistema tradicional de adquisición o como un APP.

A tal efecto, puede utilizarse un comparador del sector público (CSP) que indique el costo de la prestación pública a fin de determinar si la mejor cotización del sector privado para un contrato de APP resulta más redituable para el Estado en términos de optimización de la eficacia y eficiencia del gasto.

Cuando ya se ha tomado la decisión de utilizar una APP, es importante que el proceso de preparación del proyecto permanezca orientado a garantizar la mayor eficiencia, eficacia y a salvaguardar la viabilidad fiscal. La mejor manera de lograrlo es mediante un proceso de “compuertas de acceso” (instancias sucesivas de aprobación) supervisado por la misma secretaría de hacienda, es decir, que se requiera la autorización de la secretaría en determinadas etapas del ciclo de preparación (como planeación, la convocatoria a licitación, la presentación de ofertas y la firma del contrato) para que el proyecto avance a la siguiente etapa. (Akitoby, Hemming, & Schwartz, 2007).

El proceso de selección e implementación de APP involucra la conducción de análisis costo-beneficio y la priorización de proyectos en función de su rentabilidad, tareas en las que la aplicación de HDM-4 puede ser de gran utilidad.

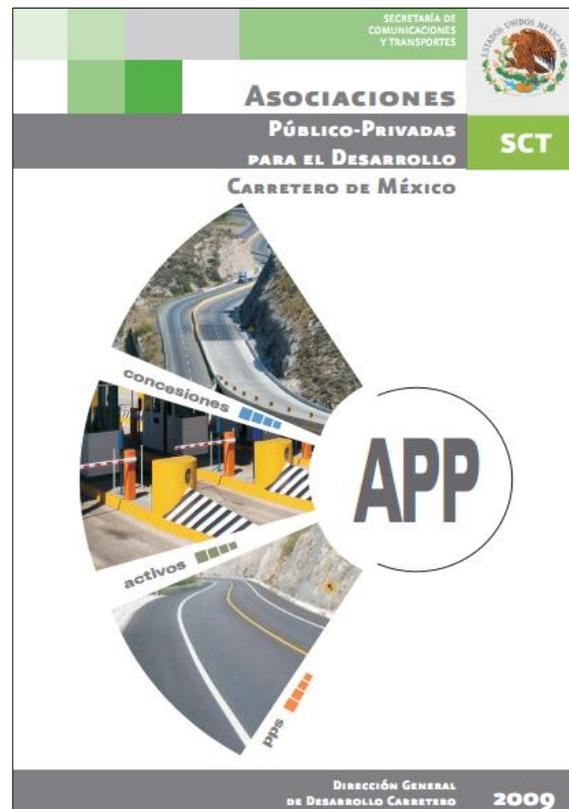


Ilustración 1-4 Asociaciones Público-Privadas para el Desarrollo Carretero de México (DGDC, 2009)



## **1.7 Factibilidad de los proyectos carreteros y análisis costo-beneficio con HDM-4**

El marco teórico en el que se fundamenta el desarrollo del presente trabajo está constituido por los principios generales de la evaluación económica de proyectos y los detalles de su aplicación a proyectos carreteros. Dado que se plantea utilizar HDM-4 como herramienta de análisis, el marco teórico también abarca a los modelos incluidos en HDM-4 para la estimación del deterioro de pavimentos, los efectos de los trabajos de conservación y para el cálculo de costos de usuario. Como cualquier tipo de proyecto de inversión, un proyecto de carreteras genera costos y beneficios, con la inversión más grande al tiempo de la construcción los beneficios distribuidos a lo largo del tiempo, lo mismo que los gastos de conservación que, al final del ciclo de proyecto, deben de ser cubiertos por las ganancias totales o ahorros por costos de operación vehicular y otros costos de usuario.

### **1.7.1 Evaluación económica de la infraestructura carretera**

La evaluación económica de los proyectos de infraestructura carretera consiste en un análisis diferencial entre una situación de referencia sin proyecto con una “situación de proyecto” que implica la realización de un proyecto. Ambas situaciones se analizan de manera independiente durante la evaluación de factibilidad, tanto desde el punto de vista técnico (evaluación de las características propias de la carretera) como del económico (costos de construcción y de operación vehicular).

Los beneficios de aplicar el análisis económico según la Federal Highway Administration para proyectos de carreteras son los siguientes:

- **Rentabilidad del diseño y la construcción:** El análisis económico puede informar a los organismos viales sobre cuál de los diseños de diversos proyectos se puede aplicar al menor costo del ciclo de vida y sobre los niveles más bajos de costos de obra y demoras al usuario; asimismo, se puede identificar el mejor equilibrio económico entre los costos.
- **Mejor retorno de la inversión:** El análisis económico puede ayudar en la planificación y ejecución de programas de transporte con la mejor tasa de retorno para cualquier presupuesto dado, o puede ser utilizado para ayudar a determinar un presupuesto por programas óptimos.
- **Comprensión de proyectos complejos:** En una época de creciente escrutinio público de los proyectos de carreteras nuevas y costosas, las administraciones de carreteras y otros tomadores de decisiones necesitan entender los verdaderos beneficios de estos proyectos, así como los efectos que los mismos tienen sobre economías regionales. Esta información puede ser también útil en el proceso de evaluación ambiental.
- **Documentación del proceso de decisión:** La disciplina de cuantificar y valorar los beneficios y costos de los proyectos carreteros, también provee una excelente documentación para explicar el proceso de decisión a las legislaturas y el público en general. (Federal Highway Administration, 2003)



### **1.7.2 Análisis costo-beneficio**

El análisis de costo-beneficio es una herramienta muy útil al evaluar alternativas que no generan beneficios idénticos, y considera los beneficios del ciclo de vida de la misma manera que los costos de este. Usado apropiadamente, el análisis costo-beneficio identifica la alternativa que ofrece los mejores beneficios económicos. (Cortés, 2005)

El costo económico de cualquier alternativa es el incremento en inversión de capital. En el caso de carreteras, algunos de los costos típicos son:

- Construcción de la vía
- Mantenimiento de la superficie de rodadura.
- Conservación de las carreteras y del derecho de vía.

Los impactos del estado de la carretera, así como de los estándares de diseño de ésta, se miden en términos de los costos de los usuarios y otros efectos sociales y medioambientales. Los costos de los usuarios incluyen:

- Costos de operación de vehículos (combustibles, neumáticos, aceite, consumo de refacciones, depreciación, utilización del vehículo, etc.)
- Costo del tiempo de viaje para pasajeros y carga.
- Costos para la economía de los accidentes de tránsito. (es decir, pérdida de vidas humanas, lesiones a los usuarios, daños a los vehículos, daños a la carretera). (SCT, 2007)

### **1.7.3 Costos de operación vehicular**

Para determinar los costos de operación vehicular, se debe hacer un análisis en el consumo de combustible, lubricantes, desgaste de las llantas, el deterioro del vehículo y los tiempos de recorrido. Conforme se va deteriorando el estado físico de una red carretera los costos de operación vehicular se incrementan, lo mismo ocurre cuando una vía se vuelve obsoleta, ya que los tiempos de recorrido se incrementan considerablemente al no existir algún carril de rebase o cuando la necesidad de ir a un lugar obliga a cruzar una ciudad en la que no existen libramientos.

El software HDM-4 considera la rentabilidad en términos de la reducción de los costos de operación vehicular cuantificando el TDPA en conjunto con la clasificación vehicular y una tasa de crecimiento anual.

Los beneficios en cuanto a costos de operación de los vehículos se pueden obtener comparando la diferencia entre los costos para condiciones reales de la red y los costos para la situación con proyecto. De esta manera se evalúa la factibilidad de asignar recursos suficientes para realizar un nuevo cuerpo o libramiento donde se reducen en forma importante estos sobrecostos, lo que redundará en ahorros significativos para el sector productivo. Similarmente, los beneficios de la alternativa deberán medirse como las ventajas económicas y de otro tipo que se generan cuando se implementa la alternativa.



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

1. Predecir el deterioro del pavimento durante su vida útil.
2. Calcular los efectos de acciones de conservación y mejoramiento del pavimento.
3. Estimar costos de operación vehicular y otros propios de los usuarios de infraestructura vial.
4. Determinar los efectos de la congestión en la velocidad de operación de vehículos en los costos de operación vehicular.
5. Evaluar proyectos, políticas y programas de conservación en términos técnicos y económicos, obteniendo los montos y beneficios de cada alternativa considerada, y calcular indicadores de rentabilidad como el valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR). En términos generales, los costos incluidos en el análisis corresponden al gasto corriente y de inversión en los que debe incurrir la organización operadora para que se ejecuten las obras, mientras que los beneficios se derivan principalmente de ahorros en gastos de operación vehicular y disminución de los tiempos de recorrido, inducidos ambos por el mejoramiento del estado físico de las carreteras, y la reducción de la congestión.
6. Optimizar programas de conservación y mejoramiento sujetos a restricciones presupuestales.
7. Calcular los montos de inversión necesarios para mantener determinado nivel de servicio en una red carretera o estimar el nivel de servicio que puede lograrse con un techo financiero dado.
8. Evaluar los efectos de políticas de largo plazo, como son cambios en las cargas legales del tránsito, estándares de conservación de pavimentos, y normas de diseño. (Solorio Murillo, Hernández Domínguez, & Gómez López, 2004)

## **1.8 Uso del HDM-4 en el mundo**

El primer paso para producir un modelo de evaluación de proyecto 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 con el *Transport and Road Research Laboratory (TRRL)* y el *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (Salgado Torres, 2010).

Debido a la necesidad de contar con los medios y las herramientas que puedan contribuir al adecuado desarrollo y la sostenibilidad de la infraestructura vial en América Latina, en los últimos años se han llevado a cabo proyectos de implementación de diversos programas e iniciativas de gestión de varios países de la región, para lo cual se ha empleado el programa HDM-4.

No obstante, el resultado de estas experiencias ha sido muy variado, desde haber logrado aceptación y continuidad en el tiempo hasta la falta de consolidación, esto último debido a la falta de convicción de las autoridades y a la insuficiencia de soporte técnico adecuado.

Uno de los mayores logros es haber alcanzado el nivel de continuidad que le ha permitido al HDM-4 consolidarse como una pieza clave y fundamental, quizá indispensable, para la toma de decisiones en materia de gestión de infraestructura vial en procesos de planeación y



gestión de entes públicos y privados. La experiencia más destacada en este sentido es tal vez la desarrollada en Chile, así como la de algunas necesidades más puntuales y asiladas en otros países. (Salgado Torres, 2010).

## **1.9 Uso de HDM-4 en México**

En México HDM-4 lo han utilizado principalmente Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), Caminos y Puentes Federales (CAPUFE), el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) y algunos gobiernos de los estados, todos enfocados al problema de la conservación de la infraestructura carretera. El IMT ha desarrollado proyectos de asistencia técnica para la implementación de HDM-4, además de impartir diversos cursos de capacitación.

La Dirección General de Conservación de Carreteras de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (DGCC) ha sido uno de los principales usuarios del HDM-4; su aplicación se ha enfocado principalmente a la elaboración del Programa Nacional de Conservación de Carreteras, en cuyas líneas de acción destacan los trabajos de mantenimiento rutinario en toda la red carretera federal, las tareas de conservación periódica y la reconstrucción de tramos deteriorados.

Aunado a lo anterior los siguientes puntos contienen descripciones de algunas de las aplicaciones del HDM-4 más significativas desplegadas por distintas entidades del país.

- CAPUFE: Obtención del anteproyecto anual de conservación periódica.
- Gobierno del Estado de Guanajuato: Gestión de la conservación anual de la red estatal y en la implementación de un sistema de gestión de pavimentos.
- Dirección General de Conservación de Carreteras de la SCT: Elaboración de proyectos de referencia para Contratos Plurianuales de Conservación de Carreteras (CPCC).
- Operadores privados: Obtención de programas de conservación para el ciclo de vida de concesiones carreteras.

En Guanajuato, la utilización del HDM-4 permitió mostrar de manera objetiva las consecuencias de las decisiones y, por lo tanto, obtener las alternativas de conservación óptimas con los criterios de mayor rentabilidad económica, conservación del patrimonio, mejoramiento del servicio al usuario y menores externalidades. (Mndoza Puga & Moreno Hernández, 2010)

La implementación de un sistema de gestión de pavimentos permite a la administración conseguir la mayor eficiencia en la asignación de recursos para mantener una red de carreteras con indicadores de calidad. En el caso de Guanajuato, los principales indicadores son el IRI y el nivel de satisfacción de los usuarios.

De lo expresado en los párrafos anteriores, puede concluirse que las aplicaciones más importantes de HDM-4 en el país se han relacionado hasta la fecha con el tema de la conservación de carreteras. A continuación, se abunda sobre las aplicaciones de HDM-4 en la Dirección General de Conservación de Carreteras de la SCT.

### 1.9.1 Aplicaciones de la DGCC

Desde el año 1994 la DGCC ha venido operando modelos de gestión como herramientas de la planeación y a partir del ejercicio 2007, se prepara anualmente el Programa Nacional de Conservación de Carreteras (PNCC) con el modelo HDM<sup>4</sup> en lo correspondiente a los rubros de conservación periódica del pavimento y reconstrucción de tramos.

Con el HDM-4 se busca desarrollar estrategias técnicas y económicas en la administración de carreteras, con el fin de aplicarlas en la planeación para la determinación del listado preliminar de obras, presupuestos tentativos, seguimiento y expectativas a largo plazo, todo ello con el objetivo de optimizar la inversión en el mantenimiento de la red carretera federal. El uso de este modelo ha permitido insertar la gestión de la red carretera en el contexto internacional, ya que se emplean valores reconocidos para la clasificación de la condición física de la red; así, se ha podido comparar la situación en México con otros países. (Osio Méndez, 2010)

### 1.10 Aplicación en la implementación de los CPCC

La SCT busca nuevos esquemas para la atención de las necesidades de mantenimiento de la red federal de carreteras, pues los recursos asignados son insuficientes y de muy alta variación (de un año a otro han existido diferencias hasta de 50% entre la asignación más alta y baja); por lo tanto, se estima que, mediante contratos integrales y plurianuales para la conservación de carreteras, se mejorara sensiblemente la atención, en busca de eficiencias

por economías de escala, especialización de los trabajos de conservación y aprovechamiento del personal. Todo ello buscando un mejor estado físico de la red.

La SCT ha denominado a este nuevo esquema de contratación *contratos plurianuales de conservación de carreteras* (CPCC). Éstos, además de ser plurianuales (períodos de 5 a 10 años), son integrales, pues involucran todas las actividades de mantenimiento y conservación de la red carretera (pavimento, estructuras, señalamiento, gestión, etc.), e incorporan indicadores de desempeño como medición de la calidad del servicio.

Los trabajos que se desarrollarán con la contratación de estos proyectos incluyen reconstrucción de tramos y puentes, conservación periódica, conservación rutinaria de tramos y puentes, puntos de conflicto (puntos negros), servicios de vialidad y de gestión, así como programación, seguimiento, evaluación de programa de obras e inventario general de la red contratada.

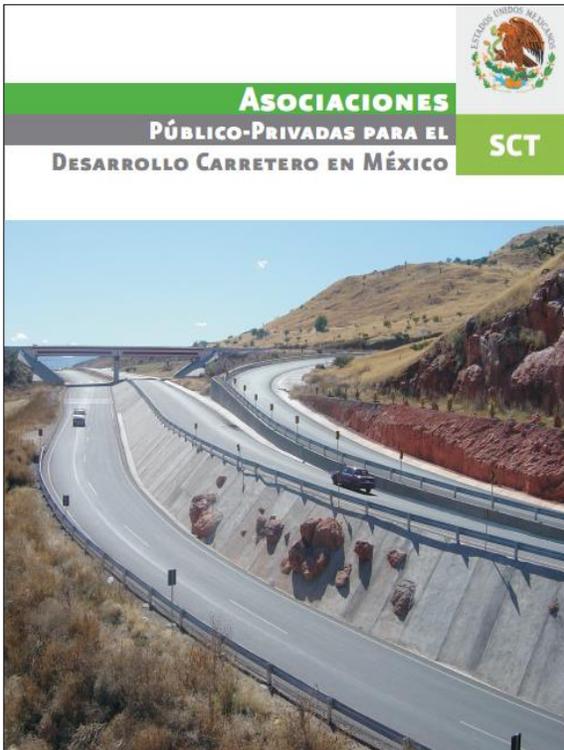


Ilustración 1-5 Asociaciones Público -Privadas para el Desarrollo Carretero en México (DGDC, 2011)



Para llevar a cabo los agrupamientos de los tramos de la red federal para armar los 31 paquetes de CPCC, que incluyen 16,203 km (40% de la red), se aplicaron los siguientes criterios:

- Atención prioritaria a tramos pertenecientes a corredores y a la red básica.
- Tránsito diario promedio anual mayor a 7 mil vehículos.
- Continuidad de rutas específicas,
- Concentración geográfica y longitudes que permitan obtener economías de escala en la gestión del sector privado (entre 400 y 800 km por paquete).
- Aspectos sociales, económicos y estratégicos de importancia, en tramos que representan la única vialidad entre dos ciudades o poblaciones, rutas turísticas, etc.).

Con HDM-4 se desarrollan estrategias técnicas y económicas en la administración de las carreteras, con el fin de determinar el listado preliminar de obras, presupuestos tentativos, seguimientos y expectativas a largo plazo, todo ello con el objetivo de optimizar la inversión en el mantenimiento de la red carretera federal.

A partir del año 2010, se ha utilizado HDM-4 para la evaluación económica y obtención de los proyectos de referencia de los CPCC y además la SCT pide HDM-4 a las empresas ganadoras de los concursos que utilicen HDM-4 en la elaboración de los programas anuales de las obras de conservación.

### **1.11 Falta de experiencia en la evaluación de proyectos de mejora y nueva construcción**

De lo antes expuesto se desprende que la implementación del HDM-4 se ha enfocado principalmente en temas de conservación dejando de lado el desarrollo de proyectos con HDM-4 para la evaluación de proyectos de mejora y nueva construcción (libramientos, ampliación, etc.), de ahí la importancia de explorar las herramientas contenidas en HDM-4 para así en un futuro sentar las bases de su aplicación y los beneficios que se pudieran obtener en la mejora de la infraestructura carretera de México.

El necesario desarrollo de la infraestructura carretera de México para proyectos como libramientos, ampliaciones y modernización de nuestra red lo que nos pone en la necesidad de desarrollar nuevas habilidades con software especializados en la gestión de carreteras.

Se espera que este trabajo contribuya a que en lo sucesivo se considere HDM-4 para la evaluación de proyectos carreteros con estándares de mejora y nueva construcción.





## Capítulo 2 Descripción General del HDM-4

### 2.1 Objetivos del desarrollo de HDM-4

Durante años, implementaciones anteriores de HDM, particularmente el modelo HDM-III, se han aplicado en diversos países para justificar los cada vez mayores presupuestos de conservación y rehabilitación de carreteras en muchos de ellos. HDM-III se ha utilizado 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 gasto. HDM-III proporciona avanzadas herramientas de análisis de inversiones en carreteras, con unas posibilidades de aplicación muy amplias en diversos climas y condiciones. Sin embargo, a finales del siglo pasado, se reconoció la necesidad de un nuevo desarrollo fundamental de los distintos modelos para incorporar una gama más amplia de pavimentos y condiciones de uso e incorporar las prácticas y expectativas informáticas más modernas. Esta iniciativa dio origen a HDM-4 (Kerali, Visión General del HDM-4, 2001)

### 2.2 El papel de HDM-4 en la gestión de carreteras.

Al considerar las aplicaciones de HDM-4, es necesario contemplar el proceso de gestión de carreteras en cuanto a las siguientes funciones:

- Planeación.
- Programación.
- Preparación.
- Operaciones.

Cada una de estas funciones se realiza como una secuencia de actividades conocidas como ciclo de gestión. (Kerali, Visión General del HDM-4, 2001)

#### 2.2.1 Planeación

La planeación comprende el análisis del sistema de carreteras en su conjunto, y típicamente, requiere la preparación de presupuestos a mediano y largo plazo o estratégicos, y de estimaciones de gastos de desarrollo y conservación de carreteras bajo diferentes supuestos económicos y presupuestales. Se pueden hacer previsiones de las condiciones de redes de carreteras bajo diversos niveles de financiamiento en términos de indicadores clave, junto con previsiones de los gastos necesarios bajo partidas presupuestales definidas. En la etapa de planeación, el sistema físico de carreteras normalmente se caracteriza por:

- Características de la red.
  - Clase o jerarquía de la carretera.
  - Flujo / cargas / congestión de tráfico
  - Tipo de pavimento.
  - Estado del pavimento.
- Longitud de la carretera en cada categoría
- Características de la flota vehicular que transita sobre la red. (Kerali, Visión General del HDM-4, 2001).



### **2.2.2 Programación**

La programación comprende la preparación, bajo restricciones presupuestales, de programas de gasto y obras de varios años, en los que se seleccionan y analizan tramos de la red que necesitarán conservación, mejora o nueva construcción. Es un ejercicio de planeación táctica. Idealmente, debería realizarse un análisis costo-beneficio para determinar la viabilidad económica de cada conjunto de obras. En la fase de programación, la red de carreteras físicas se considera segmento por segmento, con cada uno de ellos caracterizado por tramos de pavimento homogéneos definidos en términos de atributos físicos. La actividad de programación produce estimaciones de gastos para cada año, bajo partidas presupuestales definidas, para diferentes tipos de obras y para cada tramo de carretera. Los presupuestos suelen ser estimados, 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 obra 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 al interior de un departamento de planeación o conservación. (Kerali, Visión General del HDM-4, 2001)

### **2.2.3 Preparación**

Ésta es la fase de planeación de corto plazo, donde los planes de carreteras aprobados se agrupan para implementarlos. En esta fase, se refinan los diseños y se preparan con más detalle; se hacen listas de cantidades y costos detallados, junto con instrucciones para las obras y contratos. Es probable que se elaboren las especificaciones y costos detallados y también se puede hacer un análisis costo-beneficio detallado 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 su ejecución. (Kerali, Visión General del HDM-4, 2001). En el contexto de la práctica mexicana de ingeniería de carreteras, la fase de preparación correspondería a la elaboración de proyectos ejecutivos.

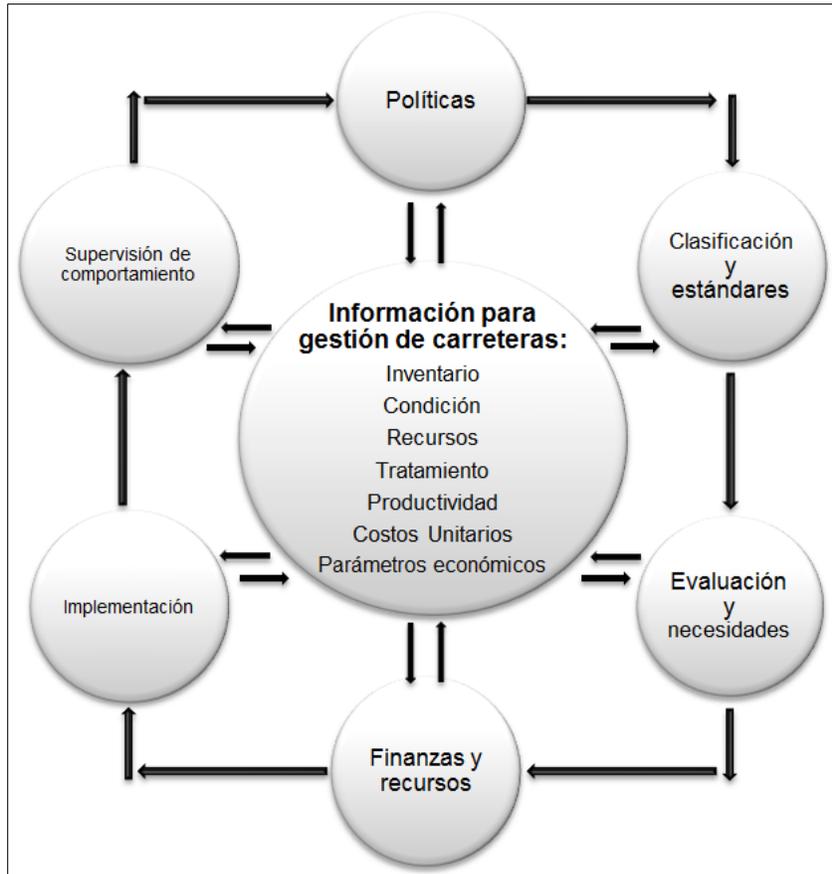
### **2.2.4 Operaciones**

Estas actividades cubren la operación diaria de una organización. Las decisiones sobre la gestión de operaciones se suelen tomar en 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 subtramos individuales de una carretera, haciéndose frecuentemente las mediciones con un nivel bastante detallado. Las operaciones las suelen dirigir subprofesionistas, como supervisores, técnicos, encargados y otros. A medida que el proceso de gestión pasa de la planificación a las operaciones, se verá que se producen cambios en los datos necesarios. Este detalle de los datos comienza como un resumen muy general, pero pasando progresivamente al nivel de detalle. (Kerali, Visión General del HDM-4, 2001)

### 2.3 El ciclo de gestión

Tradicionalmente, en muchas organizaciones de carreteras, los presupuestos y programas de 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 financiamiento o la asignación detallada son adecuados o justos. Existe claramente la necesidad de un enfoque objetivo, basado en las necesidades, que use el conocimiento del contenido, estructura y estado de las carreteras que se están gestionando. Las funciones de Planificación, Programación, Preparación y Operaciones proporcionan un marco adecuado para implementar un enfoque basado en las necesidades reales. (Kerali, Visión General del HDM-4, 2001) Que, para ser efectivo, debe aplicarse de manera cíclica, partiendo de la revisión de las políticas vigentes y abordando de manera secuencial etapas como evaluación del estado actual de los tramos de interés, evaluación de alternativas, determinación de los montos de inversión necesarios, implementación y supervisión. Lo anterior da lugar a lo que se conoce como “ciclo de gestión” (

Ilustración 2-1).



**Ilustración 2-1** Ciclo de gestión de carreteras (Kerali, Visión General del HDM-4, 2001)



### **2.3.1 Marco analítico**

El marco analítico del HDM-4 se basa en el concepto del análisis del ciclo de vida del pavimento de una carretera. Éste se aplica para predecir lo siguiente a lo largo del ciclo, que suele durar entre 15 y 40 años:

- Deterioro de la carretera.
- Efectos de las obras de conservación.
- Efectos para los usuarios de la carretera.
- Efectos socioeconómicos y medioambientales.

Una vez construidos, los pavimentos se deterioran como consecuencia de diversos factores, siendo los principales:

- Cargas del tránsito.
- Efectos medioambientales.
- Efectos de sistemas de drenaje inadecuados.

La tasa de deterioro está directamente afectada por los estándares de conservación aplicados para reparar defectos en la superficie como grietas, desprendimientos de agregados, baches, etc., o para conservar la integridad estructural (por ejemplo, tratamientos superficiales, refuerzos, etc.), permitiendo que la carretera soporte el tránsito para el que fue diseñada. (Kerali, Visión General del HDM-4, 2001)

## **2.4 Estructura general de HDM-4**

Como se aprecia en la Ilustración 2-2, HDM-4 está formado por tres componentes principales: gestores o administradores de datos, herramientas de análisis y modelos.

Los administradores de datos son las secciones del software que permiten al usuario ingresar al sistema información sobre tramos carreteros, vehículos y acciones de conservación. Las herramientas de análisis o aplicaciones implementan las funciones de gestión que han sido introducidas en el inciso y se describen con mayor detalle en el inciso 2.5. Respecto a los modelos, se trata de las relaciones internas utilizadas por HDM-4 para efectuar tareas esenciales del análisis como la predicción del deterioro de los tramos o el cálculo de costos de operación vehicular. Finalmente, como se aprecia en la misma ilustración, el sistema provee herramientas adicionales para el intercambio de información con otros sistemas.

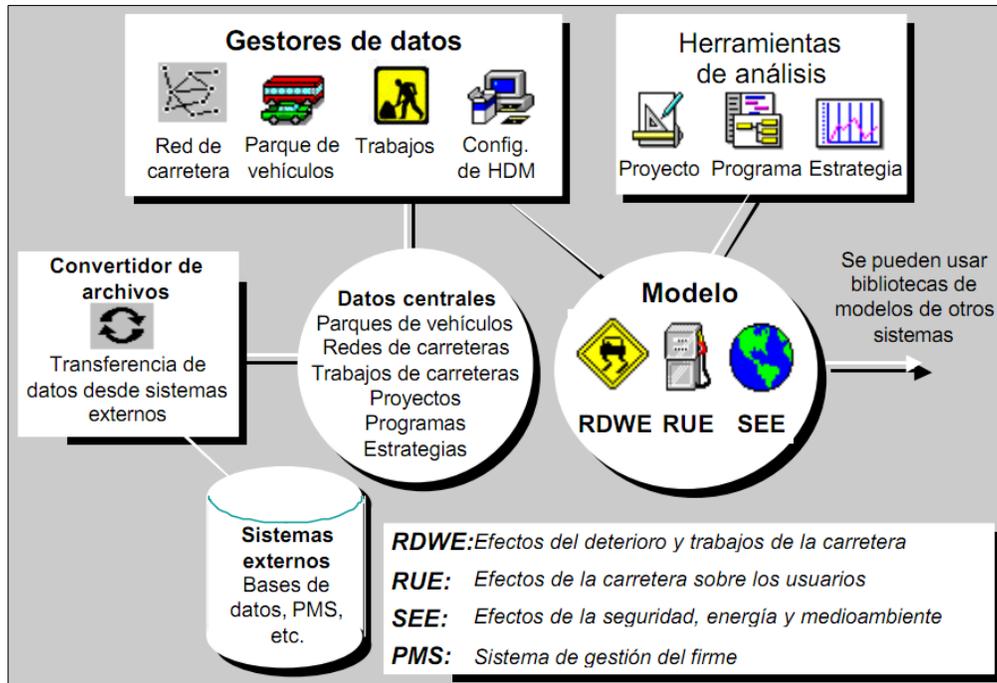


Ilustración 2-2 Estructura general de HDM-4 (Kerali, *Visión General del HDM-4*, 2001)

## 2.5 Aplicaciones de HDM-4

### 2.5.1 Análisis de estrategias

El concepto de planeación estratégica de gastos en redes de carreteras a mediano y largo plazo exige que la organización tenga en cuenta las necesidades de toda la red a su cargo. De esta forma, el análisis estratégico abarcará redes completas o subredes gestionadas por una única organización.

Para predecir las necesidades a mediano y largo plazo de toda una red o subred vial HDM-4 aplica el concepto de matriz de carreteras, que comprende las categorías de la red definidas en función de los atributos que más influyen en el comportamiento del pavimento y en los costos 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 tratar individualmente cada segmento de carretera. Como alternativa, los usuarios pueden definir una matriz de carreteras de forma que represente los factores más importantes que afectan a los costos de transporte de un país. Una matriz típica de una red de carreteras se podría clasificar en función de lo siguiente:

- Volumen del tránsito o carga.
- Tipo de pavimento
- Estado del pavimento.
- Zonas medioambientales o climáticas.
- Clasificación funcional.



El análisis estratégico se puede usar para analizar una determinada red en su conjunto y preparar estimaciones para planear las necesidades de gastos para desarrollo y conservación de carreteras a mediano y largo plazo, bajo diferentes supuestos. Se generan presupuestos de gastos para periodos a medio y largo plazo de entre 5 y 40 años. Entre las aplicaciones típicas del análisis estratégico para las administraciones de carreteras pueden citarse:

- 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 presupuesto de desarrollo (capital).
- Asignaciones óptimas de fondos a subredes; por ejemplo, por tipo funcional de carreteras (principales, secundarias y urbanas, etc.) o por regiones administrativas.

### **2.5.2 Análisis de programa**

Trata principalmente sobre la asignación de prioridades a una larga lista definida de proyectos candidatos para un programa de obra de uno o más años bajo restricciones presupuestales establecidas. Es esencial tener en cuenta que aquí se trata con una lista de proyectos 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 una administración. Como ejemplos de criterios de selección que se pueden usar para identificar proyectos candidato se incluyen:

Umbrales de conservación periódica (por ejemplo, resellado de la superficie del firme 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, pavimentar carreteras revestidas si el tránsito diario promedio anual excede de 500 vehículos por día).

Una vez identificados todos los proyectos candidatos, la aplicación de análisis de programa HDM-4 se puede usar para comparar los costos del ciclo de vida previstos bajo el régimen existente de conservación del pavimento (es decir, el caso sin proyecto) frente a los costos 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 derivan de incluir todos los proyectos candidatos en el marco de tiempo propuesto.

Hay que tener en cuenta que la diferencia entre el análisis del programa es la forma en que los arcos y tramos de carretera se identifican físicamente. El análisis del programa trata con unidades físicas únicas identificables en la red de carreteras, mientras que en el análisis de estrategias el sistema carretero pierde sus características individuales de arcos y tramos, agrupándose todos los segmentos de similares características en las categorías de la matriz de carreteras.



Tanto para el análisis de estrategias como para el de programas, 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 presupuestal. Normalmente, esa función objetivo se refiere a la maximización de los beneficios económicos derivados de las obras que se proponen.

### **2.5.3 Análisis de Proyecto**

El análisis de proyecto tiene relación con lo siguiente:

1. Evaluación de uno o más proyectos de carreteras u opciones de inversión.
2. Análisis de un tramo de carretera con los tratamientos seleccionados por los usuarios y los costos y beneficios asociados, proyectados anualmente a lo largo del período de análisis.
3. Cálculo de los indicadores económicos que corresponden a 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 los pavimentos.
- Previsiones del deterioro de la carretera, los efectos y costos de las obras durante el ciclo de vida.
- Costos y beneficios de los usuarios.
- Comparaciones económicas de las alternativas al proyecto.

Los análisis de proyecto típicos incluyen conservación y rehabilitación de carreteras existentes, ampliación del ancho y mejoras geométricas, mejora del pavimento y nueva construcción. Con respecto a implementaciones anteriores de HDM, en HDM-4 no hay cambios fundamentales a la filosofía del sistema en esta área, pero se han mejorado los modelos de deterioro de carreteras, que se han ampliado hasta cubrir una gama más amplia de pavimentos y el comportamiento de materiales en climas templados y fríos. Adicionalmente, las relaciones de costos de usuarios incluyen ahora los impactos sobre la seguridad de las carreteras.

## **2.6 Datos de entrada**

Los datos de entrada de HDM-4 pueden agruparse en las siguientes categorías:

- **Red de carretera.**
  - Contiene los datos que definen la red o subred de carreteras por analizar. En realidad, se trata de conjuntos de segmentos homogéneos que pueden o no representar una red de carreteras real y que, con frecuencia, sobre todo en el caso de los análisis de proyectos y programas, corresponden más bien a uno o a unos pocos tramos carreteros.
- **Flota vehicular.**
  - En esta sección se especifican las características del conjunto de vehículos que circulara en los tramos de interés.



- **Estándares de trabajo.**
  - . Representan conjuntos de acciones de conservación y mejora que definen una manera particular de dar atención a un tramo. Al momento de preparar un análisis, estos estándares se utilizan para definir las alternativas por evaluar.
- **Configuración HDM.**
  - Contiene todos los datos predefinidos que serán usados en el análisis; un grupo de ellos está provisto dentro del sistema, pero el usuario tiene la posibilidad de modificarlo para reflejar la realidad de las circunstancias locales. Se incluyen aquí datos sobre la capacidad de la carretera, la distribución horaria del tránsito y los coeficientes de calibración por defecto que se emplearán al hacer las corridas.

## 2.7 Análisis del ciclo de vida

El procedimiento empleado por HDM-4 es similar para los análisis de proyecto, programa y estrategia. En los tres casos, HDM-4 simula el deterioro de la carretera, los efectos de las acciones de conservación y mejora, y el impacto de ambos en los costos de los usuarios, para un conjunto de alternativas y un periodo de análisis definido por el usuario.

Dentro del análisis económico se incluyen, por un lado, los costos de inversión y el gasto corriente asociados con las acciones propuestas y, por otro lado, de los usuarios, los costos de operación de vehículos a los cuales pueden añadirse los costos de tiempo de viaje. Estos costos se determinan, estimando cantidades físicas de consumo de insumos y multiplicando esas cantidades por sus costos unitarios. Los beneficios económicos se determinan comparando los flujos de costos totales (costos de intervención y costos de usuarios) para varias alternativas de conservación y construcción con un caso base (hacer nada o hacer lo mínimo), usualmente representado por la conservación rutinaria.

Para hacer las estimaciones anteriores HDM-4 utiliza los siguientes modelos:

- **Deterioro de la carretera (RD).**
  - Predice el deterioro de la carretera para los tres tipos de superficie de rodadura considerados: asfáltica, de concreto y no pavimentada.
- **Efectos de los trabajos (WE).**
  - Simula los efectos de los trabajos propuestos sobre el estado de la carretera.
- **Efectos sobre los usuarios (RUE).**
  - Determina los costos de operación vehicular y del tiempo de viaje.
- **Efectos sociales y medioambientales (SEE).**
  - Determina los efectos producidos por emisiones y ruido, y calcula cambios en el número de accidentes y el consumo de energía.



HDM-4 está diseñado para hacer estimaciones comparativas de costos y análisis económicos de diferentes opciones de inversión. Puede calcular los costos de un gran número de alternativas año con año, para el periodo de análisis considerado, descontando los costos futuros con una tasa de actualización dada. En este proceso HDM-4 determina la tasa interna de retorno, el valor presente neto y los beneficios en el primer año. Para poder hacer estas comparaciones, son necesarias especificaciones detalladas de los programas de inversión, estándares de trabajo y alternativas de conservación o mejora, así como costos unitarios, volúmenes proyectados de tránsito y condiciones ambientales, información integrada en las categorías mencionadas en el inciso 2.6.

El modelo simula, para cada tramo de carretera y para cada año, las condiciones y los recursos usados para la ejecución de obras en cada alternativa, así como las velocidades e insumos consumidos por la operación vehicular. Las cantidades físicas relacionadas con la construcción, la conservación y la operación son estimadas y los precios y costos unitarios especificados por el usuario se aplican para determinar los costos totales. Los beneficios relativos se calculan, entonces, para las diferentes alternativas seguidos del valor presente neto y la tasa de retorno.

En la Tabla 2.1 se resume en forma gráfica la aplicación del análisis del ciclo de vida con HDM-4.

## **2.8 Programa plurianual**

Para muchos organismos viales, el ciclo de planeación a corto plazo se basa normalmente en un periodo presupuestal de un año. Sin embargo, otras administraciones de carreteras pueden adoptar un programa plurianual de obras, que podrían ser considerados como ejercicios presupuestales para tomar decisiones en cada año calendario. La opción de programa plurianual es una simplificación del método de análisis del ciclo de vida basado en la comparación de las siguientes alternativas:

- Ejecutar las obras viales programadas en el período presupuestal o
- Posponer las obras en la carretera hasta el primer año posterior al período presupuestal considerado.

Esta simplificación es una práctica habitual al formular el programa de obra ya que, si no hay recursos suficientes, entonces las obras se posponen, y esos recursos se distribuyen entre algunas de las obras originalmente programadas. Los cálculos económicos se llevan a cabo mediante la comparación de la alternativa de invertir en el período presupuestal con la de aplazar las acciones para el primer año después del ejercicio. Al emplear este tipo de análisis, se asegura que los recursos disponibles se asignen a las obras que generan los mayores beneficios.



## 2.9 Resultados de HDM-4

Los tres tipos principales resultados producidos por HDM-4 son:

**Indicadores de eficiencia económica.**

- Para los tres tipos de análisis.

**Programas de trabajo para varios años.**

- Producido después de la selección de varios posibles proyectos de carretera con base en su rentabilidad económica.

**Conservación estratégica y planes de desarrollo de carreteras.**

- Producido a partir de datos a largo plazo para el mantenimiento de redes de carreteras.

Los efectos sociales y medioambientales incluyen reducciones de emisiones de los vehículos, consumo de energía, ruido del tránsito y otros beneficios sociales a la población a la que dan servicio las carreteras. Aunque los efectos sociales y medioambientales suelen ser difíciles de cuantificar en términos monetarios, se pueden incorporar en el análisis económico del HDM-4 si se cuantifican de forma exógena. (Kerali, Visión General del HDM-4, 2002)



Tabla 2.1 Análisis de ciclo de vida usando HDM-4 (Kerali, Visión General del HDM-4, 2001)

ENTRADAS	MODELO	SALIDAS
<p>Tipo de vehículo, volumen, crecimiento, carga, parámetros físicos, terreno, precipitación, geometría de la carretera, características del firme y costos unitarios.</p>	<p>COMIENZO DEL CICLO DE ANÁLISIS</p> <p style="text-align: center;">↓</p>	<p>Fisuración, desprendimiento, baches, roderas, resaltos (pavimento); espesores de grava (sin pavimentar) y regularidad.</p>
<p>Tipo de pavimento, dureza, resistencia, edad, condición y ESAL.</p>	<p>DETERIORO DE LA CARRETERA</p> <p style="text-align: center;">↓</p>	<p>Combustible, lubricante, neumáticos, conservación, costos fijos, velocidad, tiempo de viaje, costos de los usuarios.</p>
<p>Geometría y regularidad; velocidad y tipo de vehículo; parámetros de congestión; costos unitarios.</p>	<p>EFFECTOS SOBRE LOS USUARIOS</p> <p style="text-align: center;">↓</p>	<p>Resellado, desprendimiento, baches, rodera (pavimento); espesor de la grava (sin pavimentar); regularidad, cantidad de trabajos y costos de la agencia.</p>
<p>Estándares de trabajo y estrategias.</p>	<p>EFFECTOS DE LO TRABAJOS</p> <p style="text-align: center;">↓</p>	<p>Niveles de emisión y energía usados y números de accidentes.</p>
<p>Geometría y textura de la superficie, características de los vehículos.</p>	<p>EFFECTOS SOCIALES Y AMBIENTALES</p> <p style="text-align: center;">↓</p>	<p>Costos y beneficios incluyendo beneficios externos.</p>
<p>Desarrollo, accidentes, ambiental y otros costos y beneficios externos.</p>	<p>ANÁLISIS ECONÓMICO</p> <p style="text-align: center;">↓</p>	<p>Costos totales por componente; valor actual neto y tasa de reembolso por tramo.</p>
	<p>REGRESO AL COMIENZO DEL CICLO DE</p>	



## **2.10 Aplicación de las herramientas de gestión en carreteras**

La evaluación de proyectos carreteros y su implementación mediante HDM-4 forman parte de un proceso conocido como gestión de carreteras, la cual permite a las administraciones de carreteras y a otros grupos de interés desempeñar funciones como las siguientes:

- Planear la preservación y el desarrollo de una determinada red de carreteras.
- Formular programas preliminares de mantenimiento de carreteras operadas por entidades públicas o privadas.
- Evaluar la viabilidad económica y financiera de proyectos viales.
- Preparar términos de referencia para la licitación de nuevas concesiones de carreteras en diferentes esquemas de asociación público-privadas
- Estimar las necesidades de mantenimiento durante ciclo de vida de las nuevas construcciones o proyectos de mejora en asociaciones público-privadas.
- Evaluar el desempeño de los concesionarios de carreteras. (Solorio, Ortiz, Osio, & Vazquez, 2011)



### **Capítulo 3 Uso de estándares de mejora y nueva construcción en análisis de estrategias y programas**

La realización de proyectos de mejoramiento en las carreteras contribuye al desarrollo económico y social dentro de una región, esto se debe a los ahorros generados por la reducción de costos operativos de los vehículos y la disminución del tiempo de recorrido de estos mismos.

Las principales características que se intentan modificar en un proyecto de mejoramiento, con trabajos de modernización y reconstrucción, son las condiciones de operación y seguridad. Una carretera con una superficie de rodadura afectada por la presencia de baches o roderas genera una reducción en la velocidad que eleva los costos de operación y la probabilidad de que ocurran accidentes. Lo mismo sucede cuando se tienen anchos de calzada insuficientes para el volumen de tránsito existente o cuando el alineamiento horizontal o el vertical se vuelven obsoletos.

En este capítulo se presentan ejemplos de la utilización de estándares de mejora en los análisis de programas y estrategias. Aunque la investigación está dirigida principalmente a la evaluación de proyectos de mejora y construcción nueva, empleando la aplicación de Análisis de proyectos de HDM-4, conviene hacer notar que ese tipo de estándares también pueden aplicarse con las otras herramientas de análisis del software.

Para abordar la problemática resumida en los párrafos anteriores HDM-4 permite, además del análisis de proyectos de conservación, el de los siguientes tipos de proyecto:

**Proyectos de mejora:** Son aquellos en los que los trabajos se realizan sobre la infraestructura vial existente. Comprende entre otras actividades las de:

- Construcción de nuevos carriles
- Ampliación de calzada
- Rectificación de alineamientos
- Modernización del alineamiento horizontal y vertical
- Construcción de obras de drenaje
- Señalamiento

**Proyectos de reconstrucción:** Es aquel conjunto de obras tendientes a la recuperación de las condiciones iniciales de la vía; con el propósito que se cumplan las especificaciones técnicas para las que fue diseñada. Las principales actividades para desarrollar son:

- Reconstrucción de obras de drenaje
- Recuperación del pavimento o capa de rodadura
- Reconstrucción de subbase y capas del pavimento
- Obras de estabilización



**Proyectos de nueva construcción:** Son aquellos proyectos de construcción en los que la obra de infraestructura vial se ejecuta en un sitio en el que no existe camino alguno. Incluyen:

- Carreteras nuevas.
- Libramientos.
- Pasos a desnivel.

### **3.1 Ejemplo de análisis de programas**

El ejemplo que se describe en esta sección está basado en uno similar contenido en la documentación de HDM-4, y su propósito consiste en explicar la estructura de un análisis de programas, así como ilustrar la aplicación de este tipo de análisis dentro de las administraciones de carreteras. Específicamente, el ejemplo permite determinar si es factible una ampliación de la sección transversal de un tramo debido al incremento del tránsito.

#### **3.1.1 Objetivos de los análisis de programas**

El objetivo de los análisis de programas es preparar un listado priorizado de proyectos carreteros, en función de su relación costo-beneficio, a partir de una serie definida de proyectos candidatos. Este análisis pretende estimar los niveles de inversión necesarios en el mediano plazo para cumplir las metas de las administraciones, así como examinar el impacto de las restricciones presupuestales.

Este tipo de análisis corresponde a la fase de programación descrita en el inciso 2.2.2, y trata del diseño de planes tácticos y de la toma de decisiones con respecto a los tipos de tratamiento más convenientes para atender partes de la red, que pueden incluir acciones de conservación o mejora.

Cuando todos los proyectos candidatos han sido identificados, el análisis de programas de HDM-4 se puede utilizar para comparar los costos del ciclo de vida previstos bajo un escenario de gestión de pavimentos existente (es decir, la alternativa base) frente a los costos del ciclo de vida que corresponden a alternativas de mantenimiento periódico, mejora de los caminos, o alternativas de desarrollo (obras nuevas). Esto proporciona la base para estimar los beneficios económicos que se derivan de cada proyecto (Morosiuk, Riley, & Toole, 2006)

El análisis de programas permite además preparar programas anuales de obra sujetos a las limitaciones de recursos. Aquí se emplea la priorización incremental de la relación valor presente neto / costo como un índice de clasificación eficiente y sólido para fines de establecimiento de prioridades. (Morosiuk, Riley, & Toole, 2006)

En suma, el propósito del análisis del programa es evaluar opciones de mantenimiento o mejora para tratar de seleccionar un conjunto de proyectos que maximicen la rentabilidad de las inversiones, aun en presencia de restricciones presupuestales.

### 3.1.2 Estructura general del análisis de programa

El procedimiento para el análisis de programa se resume a continuación.

- Crear el análisis de programa dándole un título y especificando la red de carreteras por analizar.
- Ingresar información general.
- Especificar el método de análisis
- Seleccionar los tramos de carretera por analizar.
- Para cada tramo de la red, crear las alternativas por evaluar y asignarles estándares de conservación y/o mejora.
- Ejecutar el análisis sin restricciones de presupuesto.
- Definir las restricciones presupuestales.
- Generar un programa de obras optimizado dentro del presupuesto limitado.
- Generar los resultados requeridos.

### 3.2 Datos de configuración para el análisis de programas

Cualquier tipo de análisis con HDM-4 requiere, en primera instancia, definir parámetros de calibración. En los siguientes párrafos se describen los datos de calibración empleados para el ejemplo de análisis de programas.

- Modelos de tránsito

En muchos casos no se cuenta con datos para definir un modelo de tránsito por lo que, para este ejemplo, se optó por emplear un modelo de flujo suburbano (“Commuter”) precargado en HDM-4, que simula el flujo horario vehicular medio con una distribución tal que, durante el día, se presentan altos volúmenes que provocan congestión y, en la noche, un volumen mínimo de vehículos.

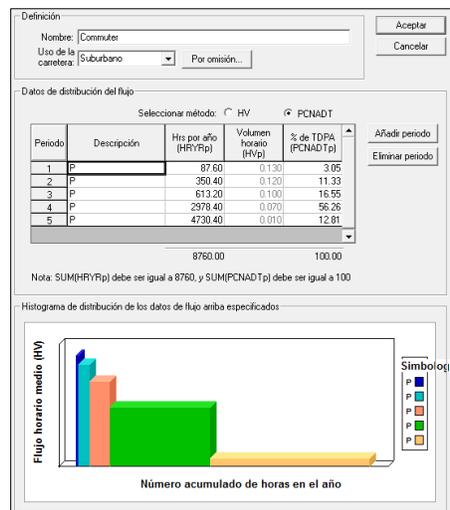


Ilustración 3-1 Modelo de tránsito de flujo suburbano (“Commuter”).



- Tipo de velocidad/capacidad

En este caso se utilizaron los datos por omisión que HDM-4 provee para una carretera de dos carriles, los cuales se encuentran agrupados en el tipo de velocidad/capacidad denominado (Two Lane Road)

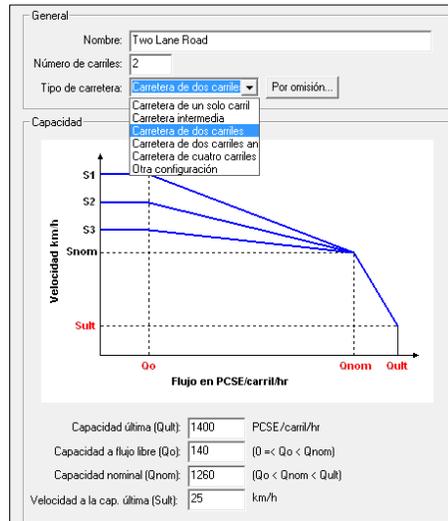


Ilustración 3-2 Tipo de velocidad/capacidad (Two Lane Road).

- Tipos de accidentes

Para este análisis no se contempla la evaluación de los efectos de la siniestralidad en el tramo, por lo que se utilizó un tipo de accidentes denominado “Two Lane Road” precargado en HDM-4, que tiene definida una tasa de 0 accidentes por cada 100 millones de veh-km.

- Series y juegos de calibración

Los juegos de calibración almacenan coeficientes de calibración de los modelos de deterioro de HDM-4 para una clase de superficie y tipo de pavimento dados.

Se definió el juego de calibración MP Pavimento (0, 0, 0), donde los números entre paréntesis son los códigos empleados por HDM-4 para identificar la clase de superficie, el tipo de pavimento y el material de la capa superficial o el tipo de subrasante según se trate de pavimentos asfálticos o de concreto. Dentro del juego se especifican coeficientes para defectos de construcción, factores de retraso para los modelos de deterioro debido a la conservación, modelo de roderas por deformación estructural y modelo de vida útil del drenaje, entre muchos otros.

Cabe mencionar que no se hicieron modificaciones a ninguno de los coeficientes, sin embargo, fue necesario definir el juego porque es un requisito de HDM-4 que todos los tramos tengan definido un juego de calibración.

- Zonas climáticas

Para este ejemplo se utilizó el tipo de clima “semiárido subtropical – cálido” precargado en HDM-4. La imagen 3.3 muestra los datos que corresponden a este tipo de clima.

Nombre:	Semiárido subtropical - cálido	
Clasificación por humedad:	Semiárido	
Índice de humedad:	-40	
Duración de la estación seca:	9	meses
Precipitación media mensual:	50	mm
Clasificación por temperatura:	Subtropical - cálido	
Temperatura media:	22	°C
Rango prom. de temperaturas:	17	°C
Días con T>32°C:	60	días
Índice de congelamiento	0	°C-día
Porcentaje del tiempo que se conduce en		
Carreteras cubiertas de nieve:	0	0<=PCTDS<=100
Carreteras cubiertas de agua:	10	0<=PCTDW<=100

Ilustración 3-3 Zona climática (Semiárido subtropical - cálido).

### 3.3 Red de carreteras y flota vehicular

A continuación, se describen los datos utilizados en las dos principales categorías de información requeridas por HDM-4, es decir, flota vehicular y red de carreteras:

#### Red Vial.

Para este análisis se creó una red representativa de la problemática asociada con tramos carreteros de dos carriles cercanos al límite de su capacidad. La red en estudio tiene una longitud de 115.5 km y se divide en 10 tramos con ancho de calzada de 7.0m, ancho de acotamiento de 1.0 m. La irregularidad máxima es de IRI=3.3 m/km y los niveles de tránsito varían entre 18,531 y 30,696 veh/día. La mezcla de tránsito corresponde a la flota vehicular nacional representativa que se describe más adelante.

Los tramos de carretera elegidos comprenden un total de 10 proyectos de carreteras con pavimentos asfálticos, como se muestra en la tabla 3.1. En la tabla 3.2 se presenta una tabla resumen de la información que es necesario definir para cada tramo carretero. A continuación, se explica de manera general cada una de las categorías incluidas en la tabla.

Tabla 3.1 Características de la red carretera.

ID	Descripción	Clase de sup.	Tipo de pavimento	Long. (km)	Irregularidad IRI (m/km)	Agriet. estr. total (%)	Baches (por km)	Tipo vel./cap.	Modelo de tránsito	Tipo de carretera
T01	Tramo 01	Asfáltica	Mezcla asfáltica sobre base gran	18.0	3.20	1.50	2.00	Two Lane	Commuter	Primary
T02	Tramo 02	Asfáltica	Mezcla asfáltica sobre base gran	11.0	2.90	1.00	2.00	Two Lane	Commuter	Primary
T03	Tramo 03	Asfáltica	Mezcla asfáltica sobre base gran	13.5	2.75	2.00	1.00	Two Lane	Commuter	Primary
T04	Tramo 04	Asfáltica	Mezcla asfáltica sobre base gran	3.5	2.85	2.00	1.00	Two Lane	Commuter	Primary
T05	Tramo 05	Asfáltica	Mezcla asfáltica sobre base gran	9.0	3.10	2.00	2.00	Two Lane	Commuter	Primary
T06	Tramo 06	Asfáltica	Mezcla asfáltica sobre base gran	2.5	2.96	3.00	0.00	Two Lane	Commuter	Primary
T07	Tramo 07	Asfáltica	Mezcla asfáltica sobre base gran	17.0	3.25	4.00	3.00	Two Lane	Commuter	Primary
T08	Tramo 08	Asfáltica	Mezcla asfáltica sobre base gran	6.0	2.78	1.60	0.50	Two Lane	Commuter	Primary
T09	Tramo 09	Asfáltica	Mezcla asfáltica sobre base gran	15.0	3.08	2.00	1.00	Two Lane	Commuter	Primary
T10	Tramo 10	Asfáltica	Mezcla asfáltica sobre base gran	20.0	3.30	2.80	2.00	Two Lane	Commuter	Primary



Tabla 3.2 Contenido de información para cada tramo.

Definición	Geometría	Pavimento	Condición	Otros	Tránsito motorizado
-Nombre de la ruta -Longitud -Ancho de calzada -Ancho de acotamientos -Dirección del flujo -Tipo de superficie -Tipo vel. /cap. -Modelo del tránsito -Clase de accidentes -Zona climática -Tipo de carretera -Serie de calibración	. Ascensos y descensos .Sobreelevación .Curvatura horizontal .Ruido de aceleración .Límite de velocidad .Cumplimiento del límite de velocidad .Altitud .Factores de reducción de la velocidad	-Tipo de pavimento -Tipo de material -Espesor más reciente -Espesor anterior -Última reconstrucción -Última rehabilitación -Último tratamiento superficial -Último tratamiento preventivo -Capacidad estructural -Bases estabilizadas	. Condición al final de año .Irregularidad (IRI) .Agrietamiento estructural .Agrietamiento térmico .Área con desprendimientos .Numero de baches .Área con rotura de borde .Profundidad media de roderas .Profundidad de la textura .Resistencia al deslizamiento .Drenaje	-Carriles separados para Tránsito No Motorizado. -Acotamientos de pavimento de concreto -Tipo de dren -Compactación pavimentos asfálticos. -Condición de la capa anterior	. Flota vehicular usada para este tramo / red de carreteras .Año de aforo .Clasificación vehicular .TDPA

**Definición:** En este punto se especifican los datos de identificación de cada tramo como nombre, identificador único, tramo al que pertenece, etc., así como otras características relacionadas con datos de configuración de HDM-4 como tipo de carretera y zona climática, entre otras.

**Geometría:** Se refiere a características correspondientes al diseño geométrico actual del segmento y a factores de reducción de la velocidad como el tránsito no motorizado y la fricción lateral.

**Pavimento:** Aquí se define el tipo de pavimento, espesor y capacidad estructural, así como el año de los trabajos de conservación realizados anteriormente (nueva construcción, sobrecarpeta, sello, etc.).

**Condición:** Esta sección contiene parámetros que definen la condición actual de la carretera, en términos de indicadores como el Índice de Regularidad Internacional (IRI), porcentajes de agrietamientos, número de baches por kilómetro, profundidad de roderas y resistencia al deslizamiento.

**Otros:** En pavimentos asfálticos se puede seleccionar el tipo de estructura de drenaje, compactación relativa, estado de la capa anterior y número efectivo de carriles (ELANES).

**Tránsito motorizado:** En esta sección se muestran los valores iniciales de TDPA en el año 2011 del tráfico motorizado; aquí podemos encontrar la clasificación vehicular, así como el año de aforo. El rango de TDPA va de aproximadamente 16,500 a 31,000 veh. /día.



Tabla 3.3 Clasificación vehicular para los diez tramos (Análisis programas).

Tramo	Longitud km	A	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4	TDPA
T1	18	22100	1228	1842	2224	2149	307	846	30696
T2	11	11905	661	992	1354	1157	165	299	16533
T3	13.5	13457	748	1121	1566	1308	187	303	18690
T4	3.5	15318	851	1277	1617	1489	213	511	21276
T5	9	18433	1024	1536	1851	1792	256	709	25601
T6	2.5	18300	1017	1525	1847	1779	254	695	25417
T7	17	17017	945	1418	1785	1654	236	578	23633
T8	6	15485	860	1290	1774	1505	215	376	21505
T9	15	17700	983	1475	1973	1721	246	485	24583
T10	20	13343	741	1112	1469	1297	185	384	18531

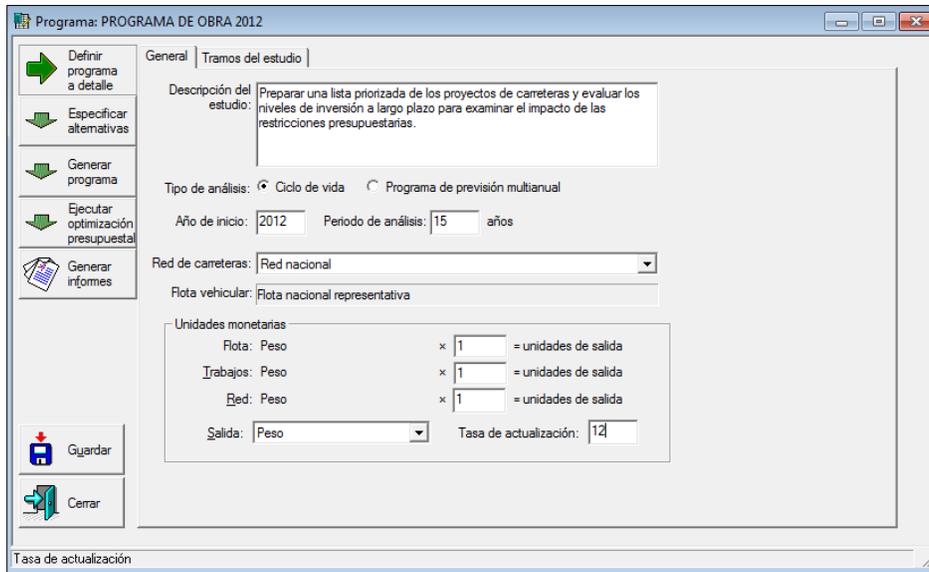
**Valuación de activos:** El presente estudio de caso no considera la valuación de activos.

### Flota vehicular

Se creó una flota denominada “flota nacional representativa” a partir de los vehículos que normalmente se aforan en las carreteras mexicanas y se definió una tasa de crecimiento del 3% anual para todos los vehículos. Siguiendo las convenciones de HDM-4, esta flota se asoció para el análisis a la red carretera descrita en los párrafos anteriores.

### 3.4 Definición del análisis

Para definir un análisis de programas se requiere definir información como la descripción del estudio, el tipo, período de análisis, la red de carreteras, flota y la moneda en la que se especifican los costos unitarios de la flota, los trabajos y la red, así como los costos de salida, como se muestra en la fig. 3.4.



*Ilustración 3-4 Ventana de HDM-4 para la definición del análisis de programas.*

En este estudio de caso se utiliza un análisis del ciclo de vida. El período de análisis inicia en el año 2012 y tiene una duración de 15 años (2012-2026). Los tramos que se analizan corresponden la “red estatal de carreteras” previamente definida con la “flota vehicular nacional”. La tasa de actualización es de 12% y todos los costos están expresados en pesos mexicanos.

### 3.5 Estándares de trabajo y alternativas

Los estándares de trabajo definen los trabajos de conservación y mejora que se proponen para colocar y mantener los tramos, en una condición acorde con los requerimientos de las administraciones de carreteras. Estos estándares intervienen en la integración de alternativas para la evaluación de los tramos con respecto a una alternativa de tratamiento mínimo o alternativa base a fin de determinar la mejora más conveniente en términos de análisis costo/beneficio.

Los estándares de conservación y mejora que se aplicaron en este caso fueron los siguientes:

#### **Estándares de conservación**

1. Conservación Normal: Conservación necesaria para que la vía se mantenga en condiciones óptimas de operación, definida en los siguientes puntos:
  - Sobrecarpeta: Sobrecarpeta de concreto asfáltico de 7cm, por aplicar cuando la rugosidad sea mayor o igual a 3.5 de IRI;
  - Limpieza y reparación del drenaje: Mantenimiento rutinario del drenaje para cada año;
  - Bacheo: Reparación anual de baches con un criterio de intervención propuesto cada año;
  - Calafateo: Calafateo y sellado de grietas, también cada año.



## Estándares de mejora

### 1. Ampliación a 3 carriles

Intervención recomendada a partir del año 2013. Se propone un incremento en el ancho de 3.5m, empleando mezcla asfáltica sobre base granular como tipo de pavimento y considerando una duración de un año en su construcción. Este estándar de mejora se aplicará cuando el TDPA sea mayor a 25,000 veh/día y menor a 31,999 veh/día.

### 2. Ampliación a 4 carriles

Intervención recomendada a partir del año 2013; supone un incremento en el ancho de calzada de 7 m, con mezcla asfáltica sobre base granular como tipo de pavimento y una duración de 2 años en su construcción. El estándar se aplicará cuando el TDPA sea mayor o igual a 32,000 veh/día.

## Alternativas

En la Tabla 3.4 se presenta la integración de las alternativas definidas para el análisis en función de los estándares antes descritos. Como puede apreciarse, las alternativas de mejora incluyen el estándar de conservación normal a fin de tomar en cuenta la conservación de los tramos posterior a su modernización.

Tabla 3.4 Alternativas utilizadas en la evaluación de los tramos.

Alternativa	Elementos de la obra	Criterios	Costos Económicos
<b>Alternativa Base</b>	Sobrecarpeta de 70 mm	IRI $\geq$ 3.5	\$ 119.00/m <sup>2</sup>
	Limpieza y reparación de drenaje	Intervalo $\geq$ 1 año	\$ 22.50/m <sup>2</sup>
	Rutina de bacheo	Intervalo $\geq$ 1 año	\$ 147.50/m <sup>2</sup>
	Calafateo y sellado de grietas	Intervalo $\geq$ 1 año	\$ 13.35/m <sup>2</sup>
<b>Alternativa de Mejora</b>	Alternativa Base +		
	Ampliación a 3 carriles	25,000 $\leq$ TDPA $\leq$ 31,999 veh/día	\$ 1'849,750/km
	Alternativa Base +		
	Ampliación a 4 carriles	TDPA $\geq$ 32,000 veh./día	\$ 3'699,500/km



Las tres alternativas se han especificado para cada proyecto y así aplicarlas en 15 períodos distintos. Este método permite reproducir las alternativas en cada año obteniendo así el año óptimo de su aplicación.

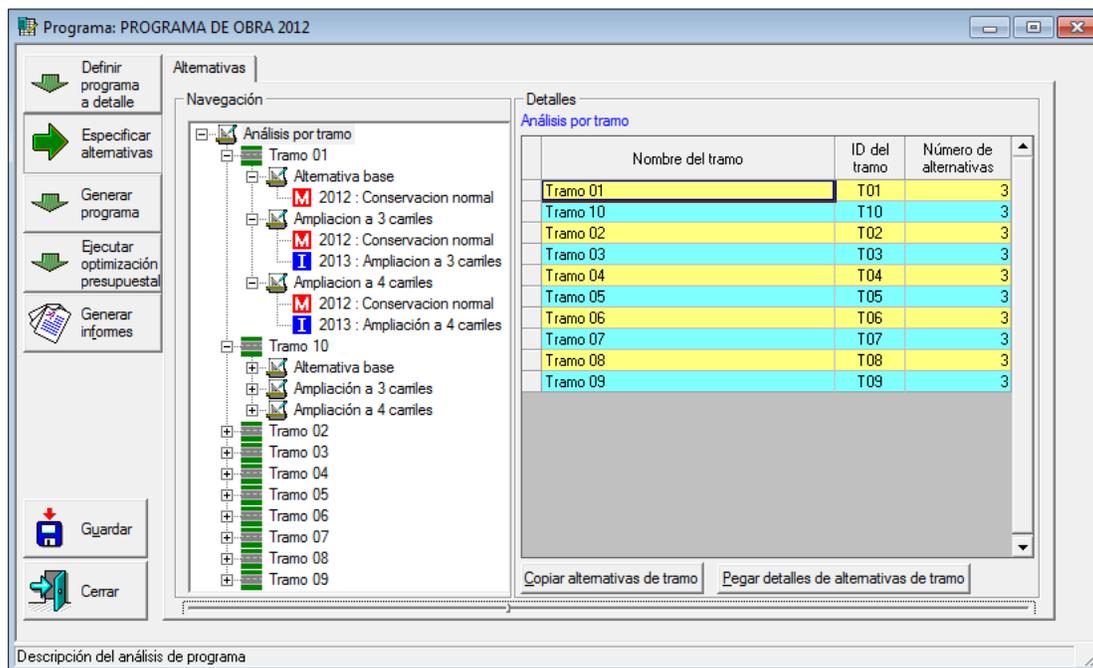


Ilustración 3-5 Visualización de las alternativas aplicadas a los tramos en HDM-4.

En la Figura 3.5 se pueden observar los diferentes tramos que integran una red carretera definida en la que se evalúan mediante la alternativa base, la ampliación a 3 carriles y una ampliación a 4 carriles.

### 3.6 Procedimiento para ejecutar la corrida

**Configurar ejecución:** Antes de iniciar el análisis debemos configurar algunos aspectos como la inclusión de modelos balance energético, emisiones, efectos de la aceleración, costos de accidentes, valuación de activos y el detalle de la exportación de resultados.

Después de haber realizado las configuraciones necesarias hacer clic en inicio y ejecutar el análisis de ciclo de vida con la alternativa base, posteriormente nos permitirá ver los resultados de análisis del programa sin restricciones.

El programa muestra las alternativas sin restricciones para cada Proyecto, en el orden tal que tiene el mayor VPN/CAP, es la solución ideal cuando no hay restricciones presupuestarias. Los parámetros clave que se muestran incluyen el año de tratamiento, el costo de capital, el costo de capital acumulado y VPN/CAP, siendo este último el indicador preferido para el establecimiento de prioridades del presupuesto de capital.



### 3.6.1 Optimizar el presupuesto

Para el análisis año por año acumulado del presupuesto sin restricciones se resume a continuación. Un total de 402.96 millones de pesos que se requieren para cubrir los costos de capital de los trabajos prioritarios. Tres escenarios son los que se presentan 90%, 75% y 50% del presupuesto sin restricciones durante un período de 15 años. Estos escenarios se tomarán en cuenta, con uno sin restricciones de 400 millones en el procedimiento de optimización del presupuesto.

*Tabla 3.5 Optimización del presupuesto por escenario presupuestal.*

Año	Costo acumulado (millones)	Período	Escenario sin restricción Presupuestal	Escenario presupuestal		
				90%	75%	50%
2012	0	1	0	3	2	1
2013	163.79	2	261.23	235	195	130
2014	206.07					
2015	209.45					
2016	238.92					
2017	261.23					
2018	261.93					
2019	261.93	3	141.73	125	105	80
2020	261.93					
2021	292.94					
2022	339.92					
2023	339.92					
2024	339.92					
2025	378.32					
2026	402.96					
<b>Total</b>			402.96	363	302	211

Se consideraron 3 escenarios presupuestarios alto, medio y bajo que se han dividido en 3 periodos donde el primer período supone el último año para ejercer un presupuesto, el segundo período donde abarcan 6 años de presupuesto quedando el tercer escenario período con 8 años del presupuesto restante.

Una vez establecidos los escenarios presupuestarios se realiza la optimización del presupuesto para producir los programas optimizados para cada escenario.

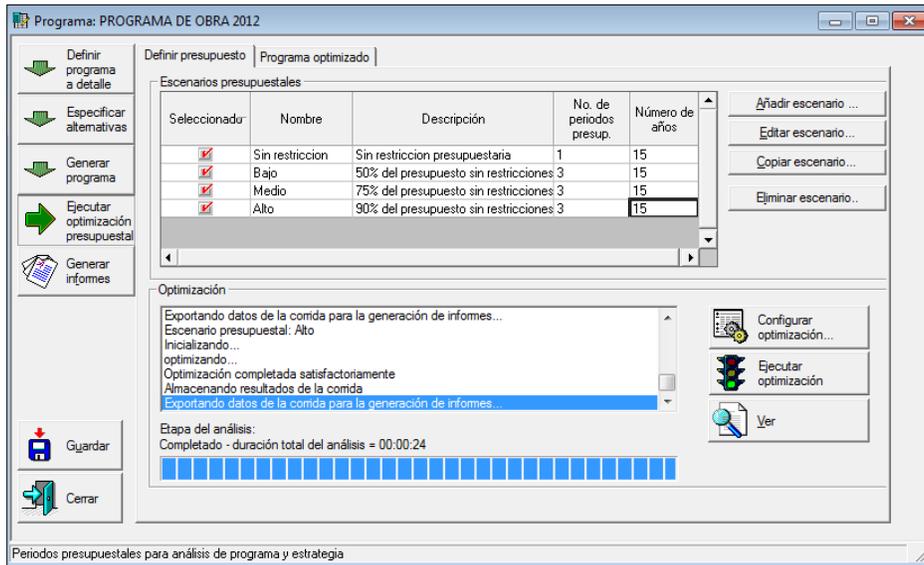


Ilustración 3-6 Visualización en HDM-4 de los escenarios presupuestarios.

Como resultado se obtiene la lista de mejoras y el costo para cada escenario.

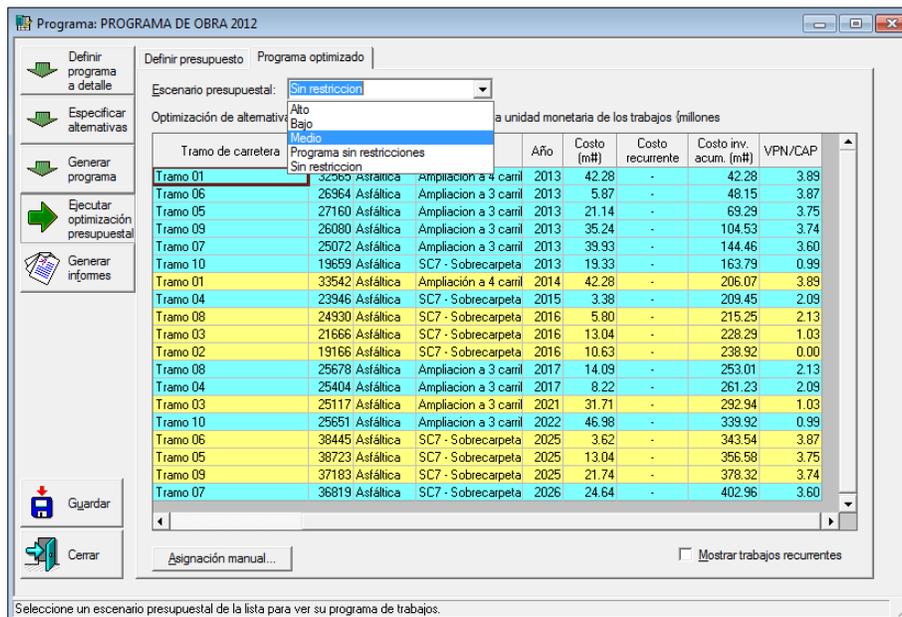


Ilustración 3-7 Resultado de alternativas para la optimización de los distintos escenarios presupuestales

### 3.7 Resultados y análisis de los informes generados por HDM-4

Después de ejecutar el análisis, ahora es posible generar informes, realizar un control similar de los informes clave para asegurar las entradas de datos y que el modelado sea lo esperado debiendo ser examinados y verificados.

La siguiente pantalla muestra la lista de informes disponibles del análisis de programas útiles para el estudio y análisis de tramos o resúmenes de las condiciones de las carreteras.

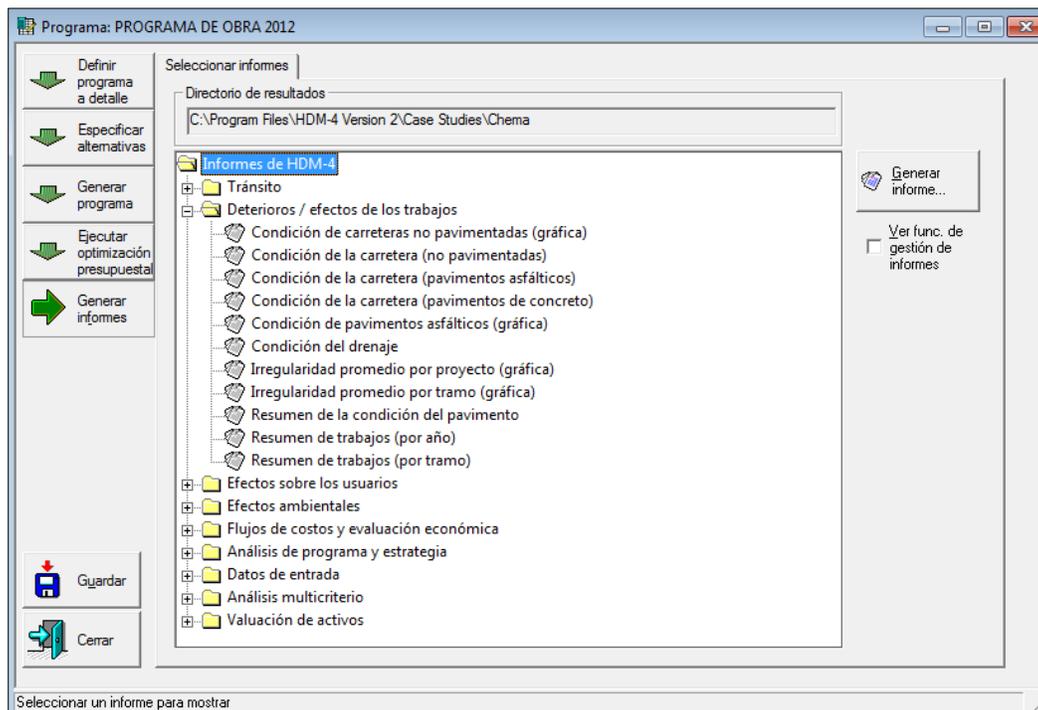


Ilustración 3-8 Resultados e informes generados por HDM-4.

El objetivo del análisis se trataba de una lista priorizada de los proyectos para la red de carreteras, en este caso compuesta por 10 tramos y así evaluar la inversión requerida a lo largo de 15 años del período de análisis para mantener en condiciones óptimas de operación vehicular al tramo, observando así el impacto de las restricciones presupuestarias con alto, medio y bajo presupuesto.

Como primera parte de los resultados obtenidos del programa sin restricciones tenemos la optimización de las alternativas y los tipos de trabajos a realizar. En la tabla 3.6 se presenta la lista de trabajos para el escenario presupuestal sin restricciones:



*Tabla 3.6 Escenario presupuestal sin restricciones (Análisis de programas).*

Tramo	Longitud (km)	TDPA	Trabajos	Año de trabajos	VPN/CAP	Costo	Costo Acumulado
T 01	18	32565	Amp. 4 carriles	2013	3.89	42.28	42.28
T 06	2.5	26964	Amp. 3 carriles	2013	3.84	5.87	48.15
T 05	9	27160	Amp. 3 carriles	2013	3.72	21.14	69.29
T 09	15	26080	Amp. 3 carriles	2013	3.72	35.24	104.53
T 07	17	25072	Ampliación 3 carriles	2013	3.63	39.93	144.46
T 10	20	19659	Sobrecarpeta	2013	0.97	19.33	163.79
T01	18	33542	Amp. 4 carriles	2014	3.89	42.28	206.07
T 08	6	24930	Sobrecarpeta	2016	2.14	5.8	211.87
T 04	3.5	24664	Sobrecarpeta	2016	1.90	3.38	215.25
T 02	11	19166	Sobrecarpeta	2016	0.03	10.63	225.88
T 08	6	25678	Ampliación 3 carriles	2017	2.14	14.09	239.97
T 04	3.5	25404	Ampliación 3 carriles	2017	1.9	8.22	248.19
T 03	13.5	22316	Sobrecarpeta	2017	.81	13.04	261.23
T 03	13.5	25117	Ampliación 3 carriles	2021	0.81	31.71	292.94
T 10	20	25651	Ampliación 3 carriles	2022	0.97	46.98	339.92
T 06	2.5	38445	Sobrecarpeta	2025	3.84	3.62	343.54
T 05	9	38723	Sobrecarpeta	2025	3.72	13.04	356.58
T 09	15	37183	Sobrecarpeta	2025	3.72	21.74	378.32
T 07	17	35747	Sobrecarpeta	2025	3.63	24.64	402.96

Se puede observar una lista de los tramos que componen la red de estudio con su longitud y TDPA. De acuerdo con el análisis de un presupuesto sin restricciones tenemos una lista de los trabajos requeridos y su año de aplicación, el indicador VPN/CAP, el costo de cada trabajo y el costo acumulado donde al final tenemos un total de 402.96 millones de pesos



requeridos para la realización de las mejoras en esta red a lo largo de 15 años del período de análisis.

Para observar el impacto presupuestario de manera sencilla, podemos observar las tablas de optimización de presupuesto y analizar las diferencias principales en cada una de ellas.

*Tabla 3.7 Escenario presupuestal medio (Análisis de programas).*

Tramo	Longitud (km)	TDPA	Trabajos	Año de trabajos	VPN/CAP	Costo	Costo Acumulado
T 06	2.5	26964	Amp. 3 carriles	2013	3.84	5.87	5.87
T 05	9	27160	Amp. 3 carriles	2013	3.72	21.14	27.01
T 09	15	26080	Amp. 3 carriles	2013	3.72	35.24	62.25
T 07	17	25072	Amp. 3 carriles	2013	3.63	39.93	102.18
T 10	20	19659	Sobrecarpeta	2013	0.0	19.33	121.51
T 01	18	32565	Sobrecarpeta	2013	0.0	17.39	138.9
T08	6	24930	Sobrecarpeta	2016	2.14	5.8	144.7
T 04	3.5	24664	Sobrecarpeta	2016	1.9	3.38	148.08
T 02	11	19166	Sobrecarpeta	2016	0.0	10.63	158.71
T 03	13.5	21666	Sobrecarpeta	2016	0.0	13.04	171.75
T 08	6	25678	Ampliación 3 carriles	2017	2.14	14.09	185.84
T 04	3.5	25404	Ampliación 3 carriles	2017	1.90	8.22	194.06
T 01	18	45078	Sobrecarpeta	2024	0.00	17.39	211.45
T 06	2.5	38445	Sobrecarpeta	2025	03.84	3.62	215.07
T 05	9	38723	Sobrecarpeta	2025	3.72	13.04	228.11
T 09	15	37183	Sobrecarpeta	2025	3.72	21.74	249.85
T 07	17	35747	Sobrecarpeta	2025	3.63	24.64	274.49
T 10	20	28870	Sobrecarpeta	2026	0.0	19.33	293.82



*Tabla 3.8 Escenario presupuestal bajo (Análisis de programas).*

Tramo	Longitud (km)	TDPA	Trabajos	Año de trabajos	VPN/CAP	Costo	Costo Acumulado
T 06	2.5	26964	Amp. 3 carriles	2013	3.84	5.87	5.87
T 07	17	25072	Sobrecarpeta	2013	0.00	16.43	22.30
T 10	20	19659	Sobrecarpeta	2013	0.00	19.33	41.63
T 01	18	32565	Sobrecarpeta	2013	0.00	17.39	59.02
T 05	9	27974	Sobrecarpeta	2014	0.00	8.70	67.72
T 09	15	26862	Sobrecarpeta	2014	0.00	14.49	82.21
T04	3.5	23946	Sobrecarpeta	2015	0.00	3.38	85.59
T 08	6	24930	Sobrecarpeta	2016	2.14	5.80	91.39
T 03	13.5	21666	Sobrecarpeta	2016	0.00	13.04	104.43
T 02	11	19166	Sobrecarpeta	2016	0.00	10.63	115.06
T 08	6	25678	Ampliación 3 carriles	2017	2.14	14.09	129.15
T 01	18	45078	Sobrecarpeta	2024	0.00	17.39	146.54
T 06	2.5	38299	Sobrecarpeta	2025	3.84	3.62	150.16
T 07	17	35747	Sobrecarpeta	2025	0.00	16.43	166.59
T 09	15	38299	Sobrecarpeta	2026	0.00	14.49	181.08
T 10	20	28870	Sobrecarpeta	2026	0.00	19.33	200.41
T 05	9	39885	Sobrecarpeta	2026	0.00	8.70	209.11

Anteriormente observamos las diferencias en los montos de inversión acumulados necesarios, para mantener la red carretera observando así, el impacto directo con los tipos de trabajos a realizar en la red de carreteras.

Habiendo optimizado el programa de mejoramiento sujeto a restricciones presupuestarias y calculado los montos de inversión necesarios para mantener determinada red de carretera con cierto nivel de servicio podemos interpretar de los informes generados por HDM-4 y así poder analizar con claridad los resultados.

### Irregularidad superficial (IRI)

Un ejemplo de ello es el gráfico de la figura 3.8 donde se presenta la evolución del índice de regularidad internacional (IRI) para cada uno de los escenarios presupuestarios definidos, también se puede apreciar la evolución de este indicador en el tiempo incluyendo la recuperación de este por efecto de las acciones de conservación aplicadas en el año, en el que llega al punto de intervención de acuerdo con los umbrales definidos con anterioridad. HDM-4 pondera estos valores para los tramos que conforman la red de estudio y así resumir el comportamiento del IRI conforme a un escenario presupuestal.

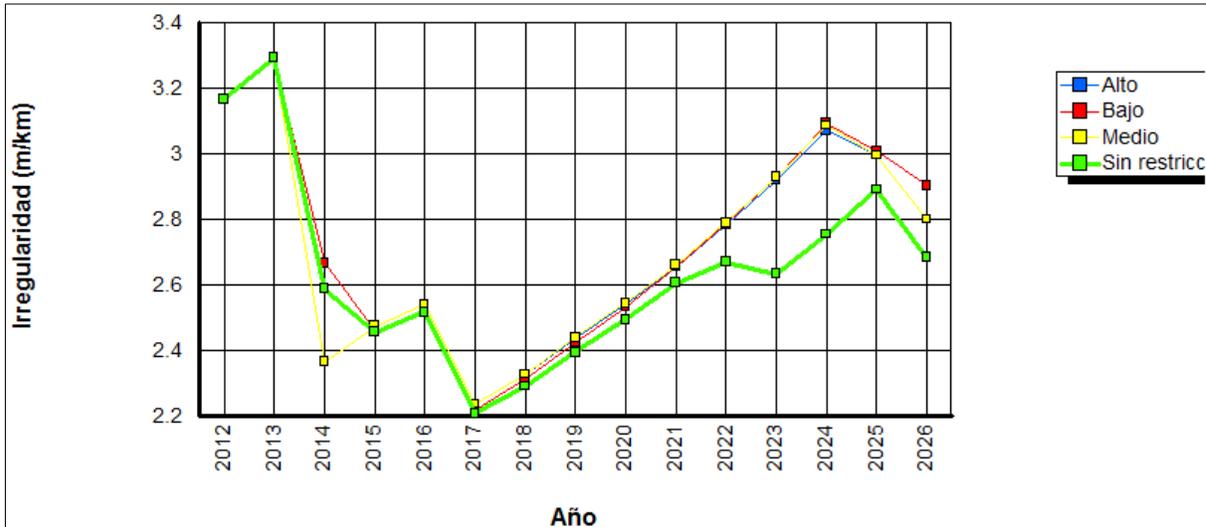


Ilustración 3-9 Gráfica de la irregularidad promedio para la red de carreteras por escenario presupuestal

### Resumen de trabajos

HDM-4 genera un resumen de trabajos por año o por tramo, a continuación, se presentan dos tablas como ejemplo de este tipo de informe.

En la tabla 3.9 se muestra una lista con los trabajos que se deben realizar a lo largo de todo el año para cada tramo, esto mismo podemos observar para todos los años de análisis.



Tabla 3.9 Listada de los trabajos por año (Análisis de programas).

<b>H D M - 4</b>		<b>Resumen de trabajos (por año)</b>				
<b>HIGHWAY DEVELOPMENT &amp; MANAGEMENT</b>		Nombre del estudio: PROGRAMA DE OBRA 2012				
		Fecha de ejecución: 26-04-2012				
		Unidad monetaria: Peso				
<b>Alternativa:</b> Alternativa base						
<b>Sensibilidad:</b> No se realizó análisis de sensibilidad						
<b>Año</b>	<b>Tramo</b>	<b>Descripción de los trabajos</b>	<b>Código</b>	<b>Costo económico</b>	<b>Costo financiero</b>	<b>Cantidad</b>
2012	Tramo 01	MR3 - Limpieza y reparación de	MR3	405.0	489.8	18.00 km
		MR2 - Bacheo	MR2	1,576.1	1,828.2	10.69 sq. m
		MR1 - Calafateo y sellado de gr	MR1	315,373.9	365,833.8	6,064.88 sq. m
	Tramo 02	MR3 - Limpieza y reparación de	MR3	247.5	287.1	11.00 km
		MR2 - Bacheo	MR2	324.5	376.4	2.20 sq. m
		MR1 - Calafateo y sellado de gr	MR1	193,030.1	223,915.0	3,712.12 sq. m
	Tramo 03	MR3 - Limpieza y reparación de	MR3	303.8	352.4	13.50 km
		MR2 - Bacheo	MR2	199.1	231.0	1.35 sq. m
		MR1 - Calafateo y sellado de gr	MR1	328,508.3	381,089.6	6,317.47 sq. m
	Tramo 04	MR3 - Limpieza y reparación de	MR3	78.8	91.4	3.50 km
		MR2 - Bacheo	MR2	51.6	59.9	0.35 sq. m
		MR1 - Calafateo y sellado de gr	MR1	85,168.8	98,795.8	1,637.86 sq. m
	Tramo 05	MR3 - Limpieza y reparación de	MR3	202.5	234.9	9.00 km
		MR2 - Bacheo	MR2	285.5	308.0	1.80 sq. m
		MR1 - Calafateo y sellado de gr	MR1	236,926.9	274,835.2	4,556.29 sq. m
	Tramo 06	MR3 - Limpieza y reparación de	MR3	56.3	65.3	2.50 km
		MR2 - Bacheo	MR2	0.0	0.0	0.00 sq. m
		MR1 - Calafateo y sellado de gr	MR1	73,769.1	85,572.1	1,418.64 sq. m
	Tramo 07	MR3 - Limpieza y reparación de	MR3	382.5	443.7	17.00 km
		MR2 - Bacheo	MR2	752.3	872.6	5.10 sq. m
		MR1 - Calafateo y sellado de gr	MR1	572,770.7	664,414.0	11,014.82 sq. m
	Tramo 08	MR3 - Limpieza y reparación de	MR3	135.0	156.6	6.00 km
		MR2 - Bacheo	MR2	44.3	51.3	0.30 sq. m
		MR1 - Calafateo y sellado de gr	MR1	135,449.8	157,121.7	2,604.80 sq. m
	Tramo 09	MR3 - Limpieza y reparación de	MR3	337.5	391.5	15.00 km
		MR2 - Bacheo	MR2	221.3	256.7	1.50 sq. m
		MR1 - Calafateo y sellado de gr	MR1	365,009.2	423,410.7	7,019.41 sq. m
	Tramo 10	MR3 - Limpieza y reparación de	MR3	450.0	522.0	20.00 km
		MR2 - Bacheo	MR2	590.0	684.4	4.00 sq. m
		MR1 - Calafateo y sellado de gr	MR1	589,881.3	684,262.3	11,343.87 sq. m
<b>Costo total anual:</b>				<b>2,902,511.4</b>	<b>3,366,913.1</b>	



En la tabla 3.10 ahora observamos un listado de todos los trabajos que se deberán realizar en cada año para el tramo que se requiera analizar.

Tabla 3.10 Listado de los trabajos por cada uno de los tramos (Análisis de programas).

H D M - 4		Resumen de trabajos (por tramo)			
HIGHWAY DEVELOPMENT & MANAGEMENT		Nombre del estudio: PROGRAMA DE OBRA 2012			
		Fecha de ejecución: 26-04-2012			
		Unidad monetaria: Peso			
Nota: Solo se muestran los tramos con trabajos programados.					
Tramo: Tramo 01					
Alternativa: Alternativa base					
Sensibilidad: No se realizó análisis de sensibilidad					
Clase de Asfáltica		Tipo de carretera: Primary or Trunk			
Longitud: 18.00km		Ancho: 7.00m			
Año	Descripción	Código	Costo económico	Costo financiero	Cantidad
2012	MR3 - Limpieza y reparacion de	MR3	405.0	469.8	18.00 km
	MR2 - Bacheo	MR2	1,576.1	1,828.2	10.69 sq. m
	MR1 - Calafateo y sellado de gr	MR1	315,373.9	365,833.8	6,064.88 sq. m
2013	MR3 - Limpieza y reparacion de	MR3	405.0	469.8	18.00 km
	SC7 - Sobrecarpeta de 7 cm	SC7	14,994,000.0	17,393,040.0	126,000.00 sq. m
2014	MR3 - Limpieza y reparacion de	MR3	405.0	469.8	18.00 km
	MR2 - Bacheo	MR2	0.0	0.0	0.00 sq. m
	MR1 - Calafateo y sellado de gr	MR1	0.0	0.0	0.00 sq. m
2015	MR3 - Limpieza y reparacion de	MR3	405.0	469.8	18.00 km
	MR2 - Bacheo	MR2	0.0	0.0	0.00 sq. m
	MR1 - Calafateo y sellado de gr	MR1	0.0	0.0	0.00 sq. m
2016	MR3 - Limpieza y reparacion de	MR3	405.0	469.8	18.00 km
	MR2 - Bacheo	MR2	0.0	0.0	0.00 sq. m
	MR1 - Calafateo y sellado de gr	MR1	0.0	0.0	0.00 sq. m
2017	MR3 - Limpieza y reparacion de	MR3	405.0	469.8	18.00 km
	MR2 - Bacheo	MR2	0.0	0.0	0.00 sq. m
	MR1 - Calafateo y sellado de gr	MR1	0.0	0.0	0.00 sq. m
2018	MR3 - Limpieza y reparacion de	MR3	405.0	469.8	18.00 km
	MR2 - Bacheo	MR2	0.0	0.0	0.00 sq. m
	MR1 - Calafateo y sellado de gr	MR1	0.0	0.0	0.00 sq. m
2019	MR3 - Limpieza y reparacion de	MR3	405.0	469.8	18.00 km
	MR2 - Bacheo	MR2	0.0	0.0	0.00 sq. m
	MR1 - Calafateo y sellado de gr	MR1	237,814.0	275,864.2	4,573.35 sq. m
2020	MR3 - Limpieza y reparacion de	MR3	405.0	469.8	18.00 km
	MR2 - Bacheo	MR2	0.0	0.0	0.00 sq. m
	MR1 - Calafateo y sellado de gr	MR1	237,814.0	275,864.2	4,573.35 sq. m
2021	MR3 - Limpieza y reparacion de	MR3	405.0	469.8	18.00 km
	MR2 - Bacheo	MR2	0.0	0.0	0.00 sq. m
	MR1 - Calafateo y sellado de gr	MR1	237,814.0	275,864.2	4,573.35 sq. m
2022	MR3 - Limpieza y reparacion de	MR3	405.0	469.8	18.00 km
	MR2 - Bacheo	MR2	0.0	0.0	0.00 sq. m
	MR1 - Calafateo y sellado de gr	MR1	238,616.3	276,794.8	4,588.77 sq. m
2023	MR3 - Limpieza y reparacion de	MR3	405.0	469.8	18.00 km
	MR2 - Bacheo	MR2	0.0	0.0	0.00 sq. m
	MR1 - Calafateo y sellado de gr	MR1	252,522.5	292,926.1	4,856.20 sq. m
2024	MR3 - Limpieza y reparacion de	MR3	405.0	469.8	18.00 km
	SC7 - Sobrecarpeta de 7 cm	SC7	14,994,000.0	17,393,040.0	126,000.00 sq. m
	MR3 - Limpieza y reparacion de	MR3	405.0	469.8	18.00 km
2025	MR2 - Bacheo	MR2	0.0	0.0	0.00 sq. m
	MR1 - Calafateo y sellado de gr	MR1	0.0	0.0	0.00 sq. m
	MR3 - Limpieza y reparacion de	MR3	405.0	469.8	18.00 km
2026	MR2 - Bacheo	MR2	0.0	0.0	0.00 sq. m
	MR1 - Calafateo y sellado de gr	MR1	0.0	0.0	0.00 sq. m
	Costo total del tramo:		31,515,605.6	36,558,102.5	



## Relación velocidad capacidad para los 10 tramos

De acuerdo con el escenario presupuestal observado tendremos diferentes trabajos de mejora para la red, lo que repercute en el comportamiento del tránsito en cuanto a la relación volumen/capacidad. Un valor de 1.0 representa a que la red está al límite de la cantidad de vehículos que pueden circular por esa vía de manera segura, cuando menor sea su valor mayor será la seguridad que un conductor pueda sentir al circular por una vía, y con ello poder desarrollar mayor velocidad en la operación de los vehículos equivalente a una mayor capacidad de la vía.

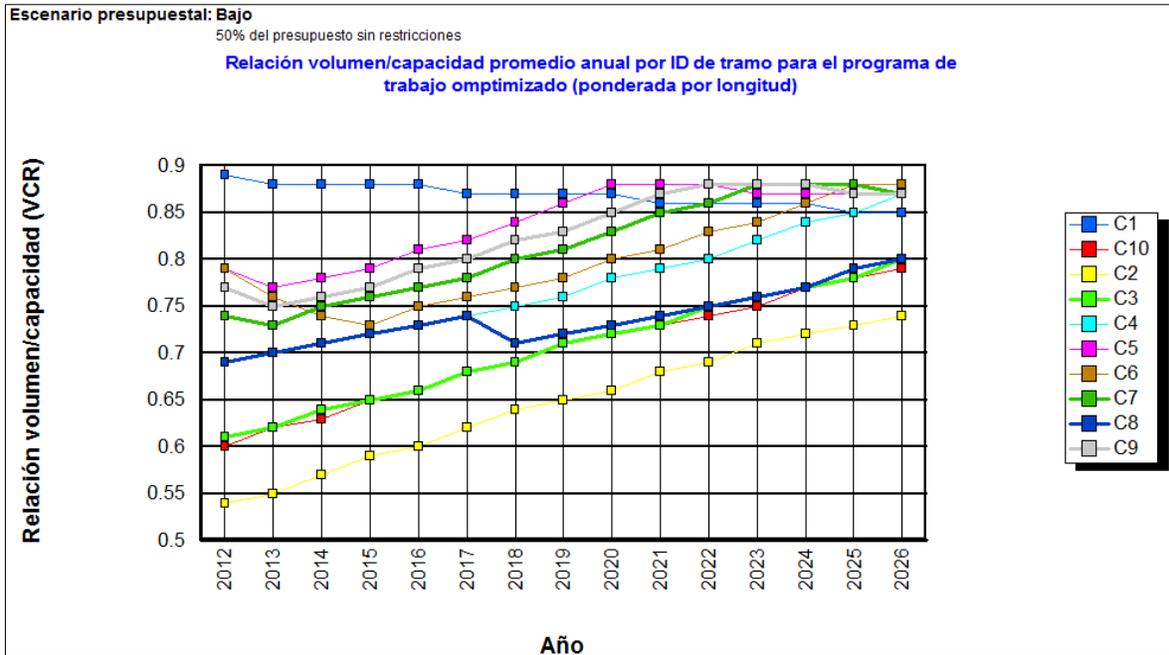


Ilustración 3-10 Gráfica de la relación entre el volumen/capacidad promedio para un escenario presupuestal (Bajo).

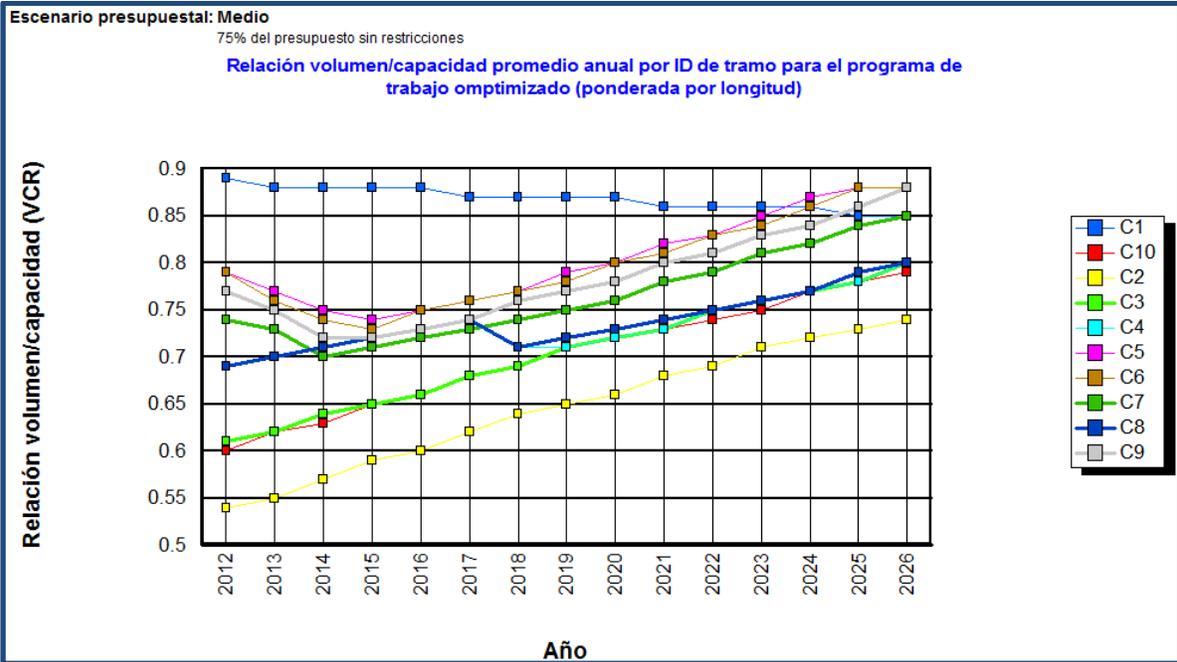


Ilustración 3-11 Gráfica de la relación entre el volumen/capacidad promedio para un escenario presupuestal (Medio).

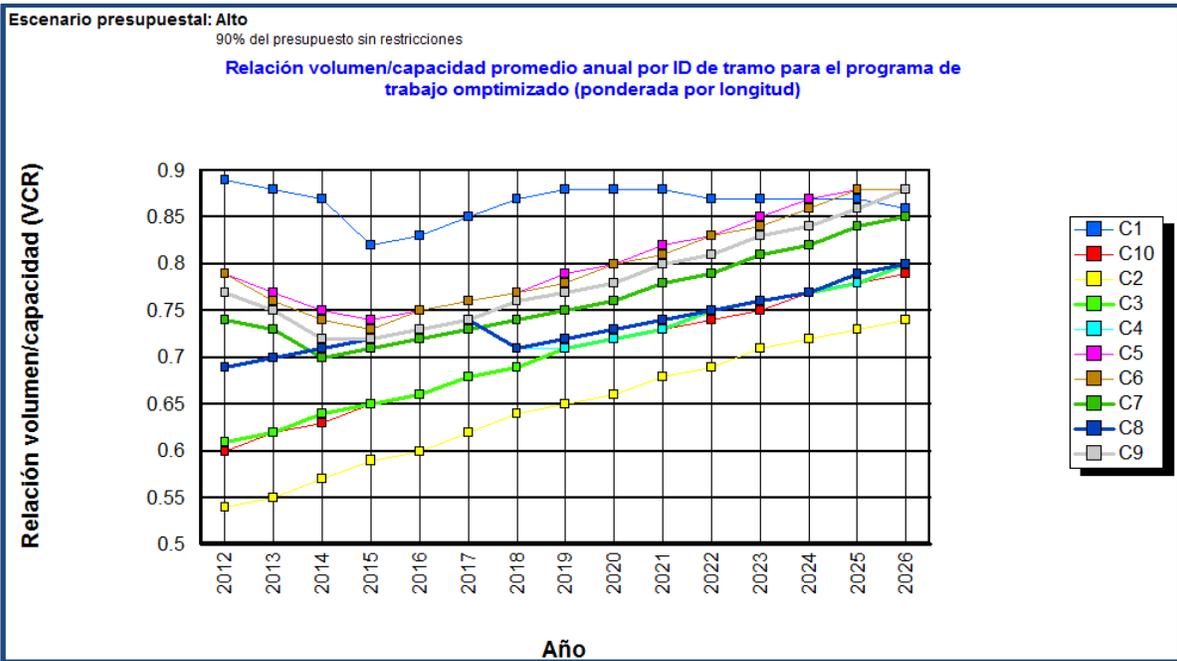


Ilustración 3-12 Gráfica de la relación entre el volumen/capacidad promedio para un escenario presupuestal (Alto).



### 3.8 Resumen de indicadores económicos.

La siguiente tabla muestra el total de presupuesto para cada escenario (alto, medio y bajo), también se muestra la cantidad de trabajos que se realizan comparando cada tipo de presupuesto, el indicador de VPN/CAP es el promedio de todos los valores a lo largo de todo el análisis.

*Tabla 3.11 Análisis técnico-económico por escenario presupuestario.*

Presupuesto	Costo Total Acumulado (mdp)	Trabajos			VPN/CAP Promedio
		Sobrecarpeta	Ampliación 3 carriles	Ampliación 4 carriles	
Alto	402.96	10	6	1	2.33
Medio	293.82	12	6	0	1.88
Bajo	209.11	15	2	0	0.70

La siguiente tabla muestra una relación para los 10 tramos analizados el número de aplicaciones de cada alternativa, un resumen de los costos de inversión, ahorros en los costos de operación vehicular y un promedio del VPN/CAP en cada alternativa.

*Tabla 3.12 Análisis económico por tipo de alternativa*

ALTERNATIVAS	Tramos	Costo de inversión	Ahorros en COV	VPN/CAP
Base	1	5.823	0.00	0.00
Ampliación 3 carriles	8	151.206	536.778	2.589
Ampliación 4 carriles	1	61.602	296.39	3.891

El valor presente neto (VPN) es la suma del decremento en costos de usuarios más los beneficios exógenos menos el incremento en costos, la relación VPN/CAP es la relación del valor presente neto dividido entre los costos de inversión.

A continuación, presentamos como HDM-4 evalúa las alternativas con el indicador VPN/CAP donde a través de este resumen observamos claramente el resultado de la alternativa con mayor VPN/CAP.



**Tabla 3.13 Indicador económico VPN/CAP de la alternativa base.**

Tramo: Tramo 02									
Sensibilidad: No se realizó análisis de sensibilidad									
Alternativa	Valor presente de los costos totales de la agencia (RAC)	Valor presente de los costos de inv. de la agencia (CAP)	Incremento en costos de la agencia (C)	Decremento en costos de usuario (B)	Beneficios exógenos netos (E)	Valor presente neto (VPN = B + E - C)	Relación VPN/costo (VPN/RAC)	Relación VPN/costo (VPN/CAP)	Tasa interna de retorno (TIR)
Alternativa base	8.322	5.823	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ampliación 3 carriles	13.483	10.928	7.142	4.206	0.000	-2.936	-0.218	-0.269	-33.8 (1)
Ampliación 4 carriles	8.322	5.823	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	Sin solución

Para el tramo dos el indicador de la relación VPN/CAP resultó negativo para la ampliación a 3 carriles, y para 4 carriles un valor de cero por lo que no se generaron beneficios por la construcción de la ampliación. Esto quiere decir que el costo para la ampliación a 3 carriles y 4 carriles fue mucho mayor que los ahorros que se pudieran generar por estas mejoras dando VPN negativos o no rentables, resultando la alternativa base como la más rentable.

**Tabla 3.14 Indicador económico VPN/CAP alternativa para ampliación a 3 carriles.**

Tramo: Tramo 03									
Sensibilidad: No se realizó análisis de sensibilidad									
Alternativa	Valor presente de los costos totales de la agencia (RAC)	Valor presente de los costos de inv. de la agencia (CAP)	Incremento en costos de la agencia (C)	Decremento en costos de usuario (B)	Beneficios exógenos netos (E)	Valor presente neto (VPN = B + E - C)	Relación VPN/costo (VPN/RAC)	Relación VPN/costo (VPN/CAP)	Tasa interna de retorno (TIR)
Alternativa base	7.850	7.147	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ampliación 3 carriles	21.531	17.005	13.682	31.232	0.000	17.551	0.815	1.032	55.0 (1)
Ampliación 4 carriles	7.850	7.147	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	Sin solución

La opción que resultó rentable para la mayoría de los tramos considerados en esta red carretera, teniendo como resultado en el tramo tres un ahorro en los costos de operación vehicular (COV) de 31.23 mdp, un VPN de 17.551 mdp y una tasa interna de retorno TIR de 55.0 haciendo que la ampliación a tres carriles para los tramos carreteros del tres al diez es la opción de inversión.

**Tabla 3.15 Indicador económico VPN/CAP alternativa para ampliación a 4 carriles.**

Tramo: Tramo 01									
Sensibilidad: No se realizó análisis de sensibilidad									
Alternativa	Valor presente de los costos totales de la agencia (RAC)	Valor presente de los costos de inv. de la agencia (CAP)	Incremento en costos de la agencia (C)	Decremento en costos de usuario (B)	Beneficios exógenos netos (E)	Valor presente neto (VPN = B + E - C)	Relación VPN/costo (VPN/RAC)	Relación VPN/costo (VPN/CAP)	Tasa interna de retorno (TIR)
Alternativa base	17.989	17.236	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ampliación 3 carriles	17.989	17.236	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	Sin solución
Ampliación 4 carriles	74.696	61.602	56.707	296.423	0.000	239.717	3.209	3.891	53.9 (1)

En la table 3.15 el tramo uno tiene un costo de 56.7 mdp producto de la inversión que costaría la construcción de la ampliación a 4 carriles. Aunado a eso tenemos los beneficios por ahorros en los costos de operación vehicular, por un total de 296.42 mdp en un periodo de análisis de 15 años, lo que da como resultado una relación VPN/CAP positiva y atractiva desde el punto de vista económico haciendo que la ampliación a 4 carriles sea una opción rentable.



### 3.9 Conclusiones

- ✓ Como primer punto tenemos la irregularidad promedio por escenario presupuestal, donde observamos que, a pesar de las diferencias entre presupuesto alto, medio y bajo las condiciones de IRI se mantienen con similitud dejando como mejor opción para mantener la red con buena irregularidad con un presupuesto medio de 293.82 mdp.
- ✓ La relación entre velocidad/capacidad para la red por escenario presupuestario, observamos una disminución de la capacidad cuando tenemos un presupuesto bajo, dejando como mejor opción por mantener buen indicador en la relación velocidad/capacidad un presupuesto medio de 293.82 mdp.
- ✓ De los indicadores económicos obtenemos que la diferencia entra cada escenario presupuestario, es alrededor de 100mdp y que los trabajos realizados con un presupuesto bajo dejarían obras necesarias sin realizar, comparando el presupuesto medio y alto obtenemos similitud en los trabajos, pero resultando un VPN/CAP mejor para un presupuesto alto de 402.96 mdp.
- ✓ En el análisis por tipo de alternativa observamos que 8 de los 10 tramos evaluados, dan como mejor alternativa la ampliación a 3 carriles y un mayor ahorro en costos de operación vehicular.

*Tabla 3.16 Resultados de la evaluación técnico – económica (Análisis de programas).*

Indicadores de Evaluación	Escenario Presupuestario
Condiciones de IRI para la red carretera	Medio
Relación Velocidad/Capacidad	Medio
Análisis por escenario presupuestario	Medio y Alto

Un presupuesto Medio del 75% del presupuesto sin restricciones que equivale a 293.82 mdp es la mejor opción para la realización de las mejoras para esta red carretera compuesta por 10 tramos.



### **3.10 Realización de un ejemplo de análisis de estrategias**

El desarrollo de este ejemplo es tomado de la documentación contenida dentro de HDM-4. El análisis de la estrategia es una red de carreteras del estado. Debido a la falta de financiación en los últimos años, en general la red está en mal estado, presenta altos niveles de rugosidad y un solo carril por sentido. Hay un gran atraso en las obras. Comprende el mantenimiento periódico de las carreteras condiciones de, rehabilitación o reconstrucción de las carreteras en mal estado y la ampliación a dos carriles, donde los volúmenes de tránsito lo justifiquen, ensanchamiento parcial y modernización de la red.

Este caso de estudio abarca aproximadamente 500 km la red de carreteras, de los cuales se evalúan 54 tramos de diferentes especificaciones, siendo el inventario fundamental (el tránsito, ancho del carril, rugosidad y estado del pavimento).

#### **3.10.1 Objetivos de un análisis de estrategias**

El análisis de estrategias es principalmente una herramienta utilizada para la asignación de recursos o para los administradores dentro de un organismo vial, los objetivos de estudio para este análisis son:

- Determinar las necesidades de la red: La solución óptima sin restricciones, sin limitaciones de presupuesto.
- Analizar los efectos de las limitaciones de los presupuestos en un período de 5 años en los niveles de servicio de la red y la distribución del gasto entre el mantenimiento, rehabilitación y obras de mejora.

Las aplicaciones típicas del análisis de estrategias son:

- A mediano y largo plazo, se emplea para las previsiones de necesidades de financiación para especificar los objetivos de las normas de mantenimiento de carreteras.
- Los pronósticos de rendimiento a largo plazo, para el rendimiento de la red vial en diferentes niveles de financiación.
- Asignación óptima de los fondos de acuerdo con partidas presupuestarias definidas, por ejemplo, el mantenimiento rutinario, mantenimiento periódico y el desarrollo de presupuestos.
- Asignación óptima de los fondos a las subredes, por ejemplo, según la clase funcional de carreteras (alimentadora principal o vías urbanas, etc.) o por región administrativa.

Estudios de políticas tales como: el impacto de los cambios en el límite de carga por eje, las normas de mantenimiento del pavimento, análisis de balance de energía, la provisión de instalaciones de tránsito no motorizado (TNM), el tamaño de la red vial sostenible, la evaluación de los estándares de diseño de pavimentos, etc. (Morosiuk, Riley, & Toole, 2006)

Con el fin de predecir a mediano y largo plazo las necesidades de una red de carreteras, el análisis de la estrategia que normalmente se aplica como el concepto de una matriz en representación de los tramos de carreteras, que comprenden las categorías de la red de carreteras definidas de acuerdo a las principales características que influyen más en las carreteras y los costos de los usuarios. (Morosiuk, Riley, & Toole, 2006)



La matriz de la red vial se define por los factores más importantes que afectan a los de transporte en la red. Por ejemplo, la matriz de una red de carreteras puede ser modelado utilizando categorías de tráfico (alto, medio, bajo), cuatro niveles de condición del pavimento (bueno, regular, malo y muy malo) y niveles de adecuación estructural (bueno, regular y malo). La matriz de la red de carreteras que resulta, por lo tanto, estaría integrado por 36 (3 x 4 x 3) secciones representativas. Entonces se puede representar por medio de una matriz todas aquellas características de una red. No hay límites para el número de secciones de pavimentos que pueden ser utilizados en un análisis de estrategias. (Morosiuk, Riley, & Toole, 2006)

### **3.10.2 Estructura general del análisis de estrategia**

El procedimiento de análisis de la estrategia se resume a continuación y se describe en las secciones siguientes.

- a) Crear el análisis de la estrategia, dándole un título y la especificación de la red de carreteras para ser analizados.
- b) Definir la estrategia mediante la especificación de:
  - Información general acerca de la estrategia.
  - Método de análisis
  - Tramos para analizar
- c) Especifique el mantenimiento y/o mejora de los estándares para ser analizados por cada tramo de carretera seleccionada.
- d) Generar un análisis de las obras sin restricciones programa.
- e) Definir las restricciones presupuestarias
- f) Generar los resultados requeridos

### **3.11 Configuración de HDM-4 para un análisis de estrategia**

Lo primero es definir los parámetros de calibración.

Modelo de tránsito

El modelo de tránsito definido para este ejemplo corresponde a un modelo de flujo interurbano (MP Flow) precargado en HDM-4 simulando una distribución con flujos horarios medios elevados una gran parte del año.



*Ilustración 3-13 Histograma de distribución de los datos de flujo (MP Flow).*

- Tipo de velocidad/capacidad

Se utilizaron los datos por omisión que HDM-4 provee para una carretera de dos carriles utilizando tres tipos (SF3, SF5, SF7) de acuerdo con su capacidad nominal.

- Tipos de accidentes

Para este análisis no se contempla la evaluación de los efectos de la siniestralidad en el tramo, por lo que se asignaron tres tipos de accidentes denominado (AC3, AC5, AC7), correspondiendo cada uno de ellos con el tipo de velocidad/capacidad que tenga cada tramo, los cuales tienen definida una tasa de accidentalidad igual a 0 accidentes por cada 100 millones de veh-km.

- Zonas climáticas

En la siguiente figura se muestran los datos utilizados para estos análisis precargados en HDM-4 para el tipo de clima (MP climate).

Nombre:	MP Climate	
Clasificación por humedad:	Subhúmedo	
Índice de humedad:	0	
Duración de la estación seca:	6	meses
Precipitación media mensual:	100	mm
Clasificación por temperatura:	Tropical	
Temperatura media:	27 °C	
Rango prom. de temperaturas:	5 °C	
Días con T > 32°C:	90 días	
Índice de congelamiento	0 °C-día	
Porcentaje del tiempo que se conduce en		
Carreteras cubiertas de nieve:	0	0 ≤ PCTDS ≤ 100
Carreteras cubiertas de agua:	20	0 ≤ PCTDW ≤ 100

Ilustración 3-14 Zona climática utilizada para el análisis (MP climate).

- Series y juegos de calibración

Anteriormente, se pudo observar que los juegos calibración almacenan coeficientes de los modelos de deterioro de HDM-4 para una clase de superficie y tipo de pavimento dados.

Para este ejercicio se utilizó el juego de calibración (MP)

Nombre: MP				
Asfáltico   Concreto   No pavimentada				
Biblioteca del modelo (DLL): HDM-4 Default DLL <span>Explorar..</span>				
Juego de calibración RD	Tipo de pavimento	Material superficial	CDS	CDB
BC	Mezcla asfáltica sobre base gran	Concreto asfáltico	1.00	0
PMC	Mezcla asfáltica sobre pavimento	Concreto asfáltico	1.00	0

Ilustración 3-15 Juego de calibración (Análisis de estrategias)

### 3.12 Datos del análisis

#### Flota vehicular:

La distribución en términos de TDPA para las siete categorías de tráfico utilizados varía entre tramos considerando una serie de crecimiento de 4.5% de incremento anual a partir del año 1.

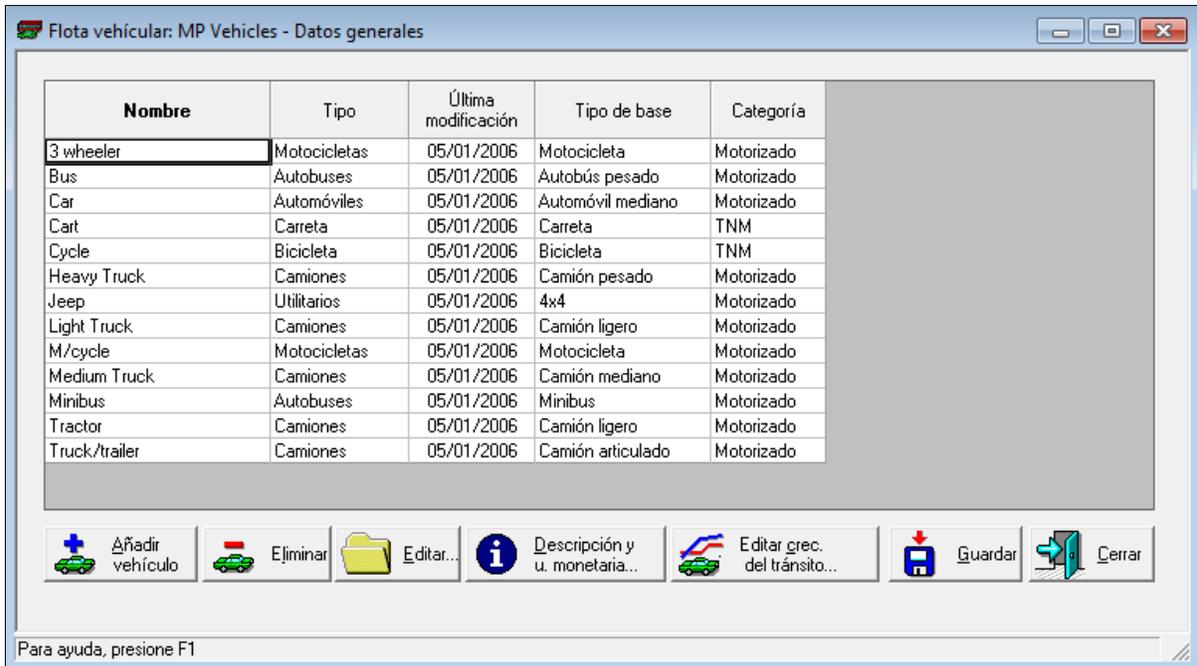


Ilustración 3-16 Flota vehicular representativa (Análisis de estrategias)

### Detalles de proyecto:

La información que aparece en la pantalla general incluye la descripción del estudio, el tipo de análisis, el período de análisis, la red de carretera, flota vehicular y la moneda que se utiliza para el análisis de estrategias.

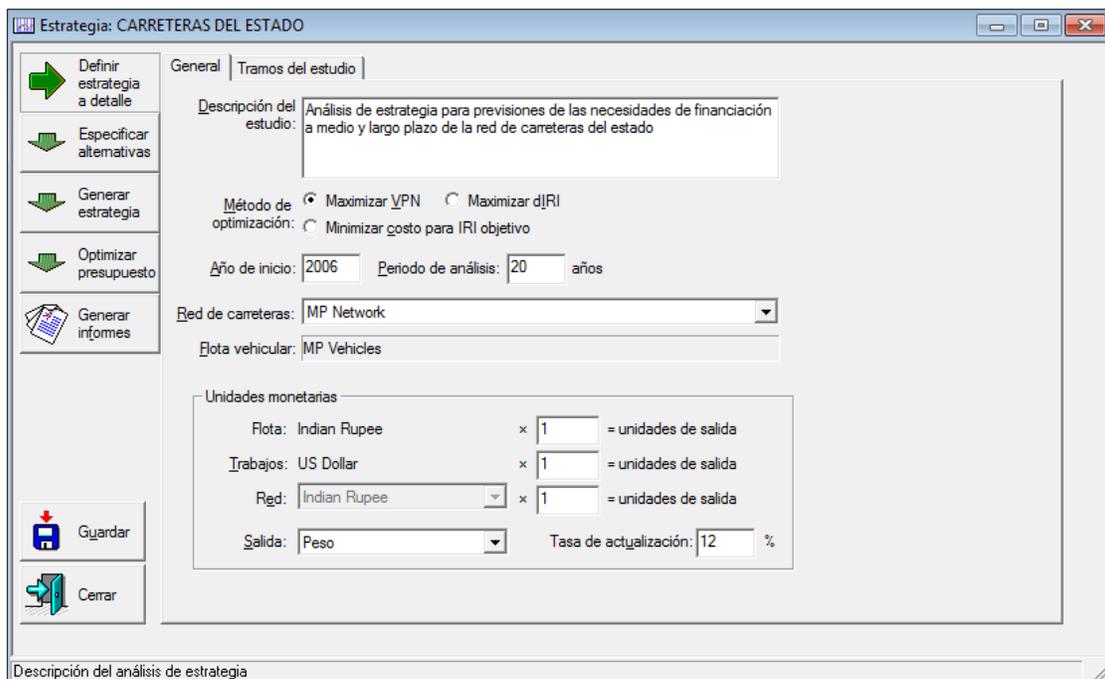


Ilustración 3-17 Ventana de HDM-4 para la definición de los detalles del programa.



Existen 3 métodos de optimización diferentes, donde se busca maximizar el indicador del VPN/CAP, otro donde el objetivo es maximizar el índice de regularidad del pavimento (IRI) y, por último, uno cuyo objetivo es minimizar el costo para mantener con un valor regular de IRI. El método de optimización seleccionado para este estudio de caso es maximizar el valor actual neto. El período de análisis se define el comienzo por el año 2006 y una duración de 20 años (2006-2025). La moneda que se utiliza para este análisis es el peso y la tasa de actualización es del 12%.

### Red de carreteras:

La red en estudio tiene una longitud significativa de las secciones de un solo carril (3-4 m) e intermedio (5-6 m). La rugosidad máxima de un IRI= 12, los niveles de tránsito varían desde 0 hasta 10,000 vehículos al día. La mezcla de tránsito corresponde a la flota vehicular nacional.

En este caso, 54 secciones representativas se han seleccionado de la red de carreteras del estado para su análisis. A cada sección se le dio un identificador, que significa la categoría de tráfico, la categoría de la rugosidad y la categoría de carretera de ancho. Por ejemplo, la sección T1R2W3 tenía los valores representativos de la categoría de tráfico 1, categoría 2 de la rugosidad y del ancho de calzada 3.

Incluir en el estudio	ID	Descripción	Tipo	Pavimento	Crecimiento del tránsito
<input checked="" type="checkbox"/>	T4R3w1	T4R3w1	Secondary or ...	Asfáltica	MP
<input checked="" type="checkbox"/>	T4R2w3	T4R2w3	Secondary or ...	Asfáltica	MP
<input checked="" type="checkbox"/>	T4R2w2	T4R2w2	Secondary or ...	Asfáltica	MP
<input checked="" type="checkbox"/>	T4R1w3	T4R1w3	Secondary or ...	Asfáltica	MP
<input checked="" type="checkbox"/>	T3R5w3	T3R5w3	Secondary or ...	Asfáltica	MP
<input checked="" type="checkbox"/>	T3R5w2	T3R5w2	Secondary or ...	Asfáltica	MP
<input checked="" type="checkbox"/>	T3R5w1	T3R5w1	Secondary or ...	Asfáltica	MP
<input checked="" type="checkbox"/>	T3R4w3	T3R4w3	Secondary or ...	Asfáltica	MP
<input checked="" type="checkbox"/>	T3R4w2	T3R4w2	Secondary or ...	Asfáltica	MP
<input checked="" type="checkbox"/>	T3R4w1	T3R4w1	Secondary or ...	Asfáltica	MP
<input checked="" type="checkbox"/>	T3R3w3	T3R3w3	Secondary or ...	Asfáltica	MP
<input checked="" type="checkbox"/>	T3R3w1	T3R3w1	Secondary or ...	Asfáltica	MP
<input checked="" type="checkbox"/>	T3R2w3B	T3R2w3B	Secondary or ...	Asfáltica	MP
<input checked="" type="checkbox"/>	T3R2w3A	T3R2w3A	Secondary or ...	Asfáltica	MP
<input checked="" type="checkbox"/>	T3R2w1A	T3R2w1A	Secondary or ...	Asfáltica	MP
<input checked="" type="checkbox"/>	T3R1w3	T3R1w3	Secondary or ...	Asfáltica	MP
<input checked="" type="checkbox"/>	T2R5w3	T2R5w3	Secondary or ...	Asfáltica	MP
<input checked="" type="checkbox"/>	T2R5w2	T2R5w2	Secondary or ...	Asfáltica	MP
<input checked="" type="checkbox"/>	T2R5w1C	T2R5w1C	Secondary or ...	Asfáltica	MP
<input checked="" type="checkbox"/>	T2R5w1B	T2R5w1B	Secondary or ...	Asfáltica	MP
<input checked="" type="checkbox"/>	T2R5w1A	T2R5w1A	Secondary or ...	Asfáltica	MP
<input checked="" type="checkbox"/>	T2R4w3	T2R4w3	Secondary or ...	Asfáltica	MP
<input checked="" type="checkbox"/>	T2R4w2	T2R4w2	Secondary or ...	Asfáltica	MP

Ilustración 3-18 Tramos o red carretera representativa para la ejecución de la corrida.



### 3.13 Estándares de trabajo

Para el análisis de estrategias se definieron cuatro estándares de conservación y tres estándares de mejora los cuales se aplicaron de acuerdo con las necesidades de cada tramo, a continuación, se explica cada uno de ellos.

#### Estándares de conservación:

1. Routine: Conservación de rutina mínima necesaria para que la vía se mantenga en óptimas condiciones de circulación, contenida en los siguientes puntos:
  - Edge repair: Reparación de borde cuando sea mayor o igual a  $1 \text{ m}^2/\text{km}$ .
  - Patching: Bacheo cuando sea mayor a 10 baches/km.
2. Renewal: Renovación de la superficie de rodadura y así elevar las condiciones de circulación.
  - Overlay 40mm: Sobrecarpeta de 40mm de espesor cuando el TDPA sea mayor de 10,000 veh/día y la rugosidad menor a un valor de 6.
  - Overlay 30mm: Sobrecarpeta de 30mm de espesor cuando el TDPA sea mayor de 2,000 veh/día y menor de 10,000 veh/día. y la rugosidad menor a un valor de 6.
  - Overlay 20mm: Sobrecarpeta de 20mm de espesor cuando el TDPA sea menor de 2,000 veh/día y la rugosidad menor a un valor de 6.
3. Long Term Maintenance Policy: Políticas de mantenimiento a largo plazo que trata de una conservación periódica para el mantenimiento de la vía a largo plazo contenida en los siguientes puntos:
  - Reconstruction 40mm: Reconstrucción de 40mm de espesor cuando la rugosidad sea mayor a 12 y el TDPA menor a 500 veh/día.
  - Reconstruction 100mm: Reconstrucción de 100mm de espesor cuando la rugosidad IRI sea mayor a 12 y menor a 30, el TDPA mayor a 500 veh/día.
  - Rehabilitation 110mm: Rehabilitación de 110 mm de carpeta cuando la rugosidad sea mayor a 6 y menor a 12 de IRI.
  - Overlay 40mm: Sobrecarpeta de 40mm de espesor cuando el TDPA sea mayor de 10,000 veh/día. y la rugosidad sea mayor a 5 y menor a un valor de 6.
  - Overlay 30mm: Sobrecarpeta de 30mm de espesor cuando el TDPA sea mayor de 2,000 veh/día. y menor de 10,000 veh/día. y la rugosidad sea mayor a 5 y menor a un valor de 6 IRI.
  - Overlay 20mm: Sobrecarpeta de 20mm de espesor cuando el TDPA sea menor de 2,000 veh/día. y la rugosidad sea mayor a 5 y menor a un valor de 6 IRI.
4. Rehabilitation: Rehabilitación de la superficie de rodadura y así elevar las condiciones de circulación.
  - Rehab 170mm: Rehabilitación de la carpeta cuando el TDPA sea mayor a 10,000 veh/día. y un a rugosidad mayor a 5 y menor a 12 IRI.
  - Rehab 110mm: Rehabilitación de la carpeta cuando el TDPA sea menor a 10,000 veh/día. y un a rugosidad mayor a 5 y menor a 12 IRI.



Tabla 3.17 Estándares de conservación (Análisis de estrategias).

Estándar	Descripción
<i>Routine</i>	Conservación de rutina (Asfalto)
<i>Renewal</i>	Renovación a base de microcarpetas (Asfalto)
<i>Long Term Maintenance Policy</i>	Conservación periódica (Asfalto)
<i>Rehabilitation</i>	Rehabilitación superficial con sobrecarpetas (Asfalto)

### 3.14 Estándares de mejora

1. Reconstruct 40mm: Reconstrucción del pavimento asfáltico, cuando la rugosidad sea mayor a 10 y menor a 30 IRI. Con un espesor de 40mm de mezcla asfáltica sobre base granular con una duración de 1 año en los trabajos de reconstrucción.
2. Reconstruct 100mm: Reconstrucción del pavimento asfáltico, cuando la rugosidad sea mayor a 10 y menor a 30 de IRI. Con un espesor de 100mm de mezcla asfáltica sobre base granular, con una duración de 1 año en los trabajos de reconstrucción.
3. Widen to 7m: Ensanchamiento a 7 metros de calzada para los tramos con TDPA mayor a 10,000 veh/día.

Tabla 3.18 Estándar de mejora (Análisis de estrategias)

Estándar	Descripción
Reconstruct 40mm	Reconstrucción de 40mm del pavimento (Asfalto)
Reconstruct 100mm	Reconstrucción de 100mm del pavimento (Asfalto)
Wide to 7m	Incremento en ancho de 7m (Asfalto)

### Alternativas

Tabla 3.19 Alternativas utilizadas en la evaluación de la red carretera.

Alternativa	Elementos de la obra	Criterios
Alternativa Base (Mantenimiento de Rutina y Políticas de mantenimiento a largo plazo)	Reparación de borde	Rotura borde $\geq 1$ m <sup>2</sup> /Km
	Rutina de bacheo	Baches $>10$ No. /Km
	Rehabilitación 110mm	$6 \leq$ Rugosidad $\leq 12$
	Reconstrucción (40 y 100 mm)	IRI $\geq 12$ Rec 40 TDP $\leq 500$ Rec 100 TDPA $\geq 500$



REN_0 Renovación	Comprende trabajos de sobrecarpeta de 20mm, 30mm y 40mm	IRI<=6 DPA>=10,000 veh/día.
REH_0 Rehabilitación	Rehabilitación de 110mm y 170mm de espesor	5<=IRI<=12 TDPA>= 10,000 veh/día.
REC_0 Reconstrucción	Reconstrucción de 40 mm y 100mm de espesor	Rec 40, 10<=IRI<=30 Rec 100, 10<=IRI<=30
WID_0 Ensanchamiento	Carretera tipo primaria, superficie asfáltica sin incremento en y un espesor de 75mm.	IRI >= 10

- Alternativa 1 es la alternativa Base: Comprende el mantenimiento de rutina que incluye reparaciones de borde y rutina de bacheo, también está compuesta por políticas de mantenimiento a largo plazo que tiene trabajos como la rehabilitación cuando la rugosidad se encuentra entre 6 y 12, la reconstrucción cuando tiene un IRI mayor a 12 y el espesor dependerá del TDPA.
- Alternativa 2 es la Renovación superficial del pavimento: Esta alternativa está compuesta por sobrecarpetas de 20mm, 30mm y 40mm de espesor dependiendo de las necesidades de renovación con material superficial de concreto hidráulico, el criterio de intervención se aplica cuando se tiene un valor menor a 6 de IRI y un TDPA mayor a 10,000 veh/día, los trabajos de sobrecarpetas mejoran la calidad de rodadura aumentando la seguridad y confort para los usuarios.
- Alternativa 3 corresponde a la rehabilitación del pavimento: Esta alternativa está compuesta por estándar de conservación correspondiente a la rehabilitación de 110mm y 170mm de espesor del pavimento la intervención se da cuando la rugosidad se encuentra entre un valor de 5 y 12, cumpliendo así con un TDPA mayor a 10,000 veh/día. La alternativa consiste la rehabilitación del pavimento bajando la regularidad superficial a un valor de 2.5 de IRI.
- Alternativa 4 es la Reconstrucción: Esta alternativa corresponde a un estándar de mejora para la reconstrucción de pavimento con mezcla asfáltica sobre base granular de 40mm o 100mm de espesor, el criterio de intervención utilizado es cuando la rugosidad se encuentre entre los valores 10 y 30, tiene como principal efecto la reducción del IRI hasta un valor de 2.5 y la mejora estructural del pavimento.
- Alternativa 5 corresponde al ensanchamiento a 7.0m: Esta alternativa está compuesta por un estándar de mejora para un incremento en ancho igual a 7.0m, con un espesor superficial de 100mm con pavimento de mezcla asfáltica sobre base granular, el criterio de intervención se aplica cuando exista un TDPA mayor a 1,000 veh/día.

### 3.15 Ejecución del análisis

Hacer clic en inicio para comenzar el análisis de la red carretera con las alternativas definidas y el método de optimización (Maximizar VPN), obteniendo así la primera parte de los resultados de la corrida en el programa sin restricciones presupuestarias.

El programa muestra las alternativas sin restricciones para cada Proyecto, en el orden tal que tiene el mayor VPN/CAP y es la solución ideal cuando no hay restricciones presupuestarias. Los parámetros clave que se muestran incluyen el año de tratamiento, el costo de capital, el costo de capital acumulado y VPN/CAP, siendo este último el indicador preferido para el establecimiento de prioridades del presupuesto de capital.

#### 3.15.1 Optimizar el presupuesto

Los escenarios presupuestarios que han de ser analizados deben ser definidos. Para este caso, el análisis considera un total de 3258.37 millones de pesos que se requieren para cubrir los costos de capital de los trabajos prioritarios. Para la restricción presupuestaria se considera para los primeros 5 años y posteriormente un presupuesto asignado sin restricciones.

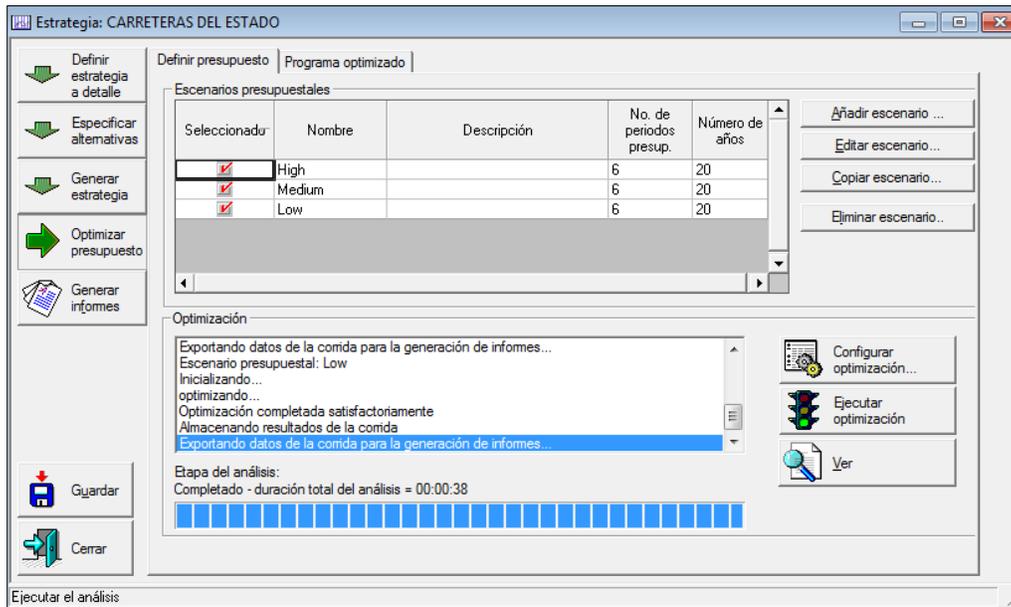


Ilustración 3-19 Visualización en HDM-4 de los escenarios presupuestarios.

Los escenarios de restricción de presupuesto se han creado en este estudio de caso, alto, medio y bajo proponiendo lo siguiente:

Tabla 3.20 Escenarios presupuestarios propuestos.

Escenario Presupuestal	Presupuesto
Bajo	225 mdp en los primeros 5 años
Medio	338 mdp en los primeros 5 años
Alto	450 mdp en los primeros 5 años

Para los años subsecuentes se considera un presupuesto sin restricciones, dejando las limitaciones para los primeros 5 años de la administración del presupuesto. Posteriormente, se obtiene la lista de los trabajos de mejora y conservación para la red de carreteras, así como el costo en los distintos escenarios presupuestarios

Una vez configurados los escenarios presupuestarios, a continuación, el usuario debe hacer clic en realizar la optimización del presupuesto, para producir los programas optimizados para cada escenario.

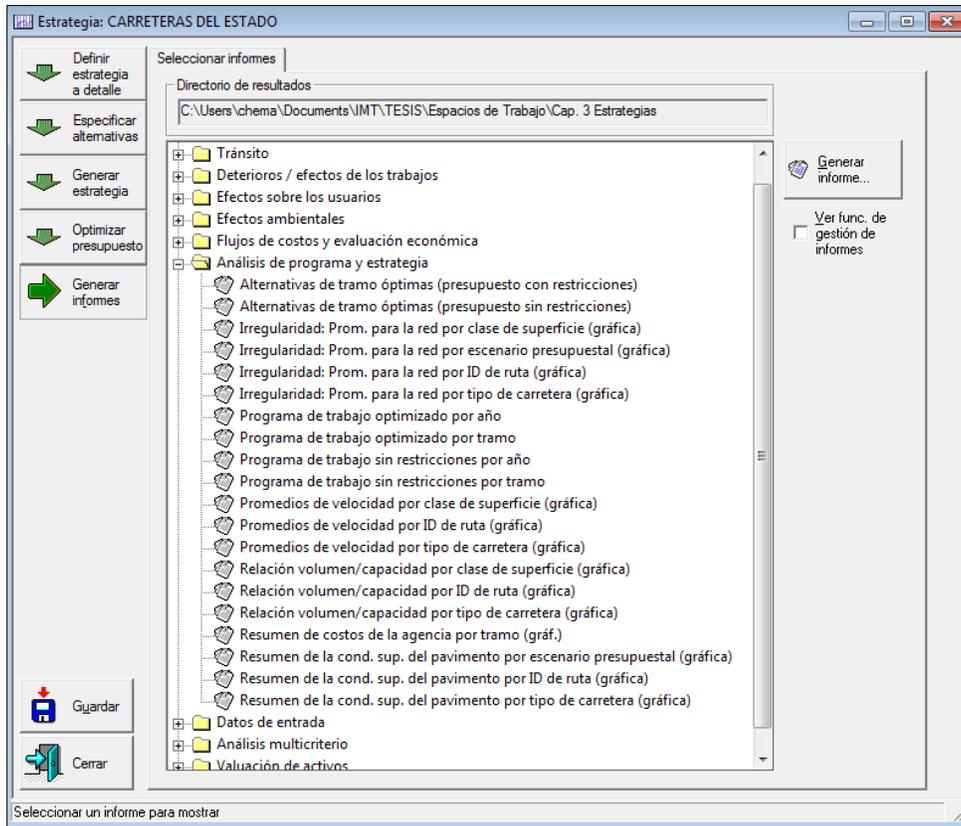
Tramo de carretera	Optimización de alternativa	Pavimento	Trabajos	Año	Costo (m\$)	Costo recurrente	Costo inv. acum. (m\$)	VPN/CAP
T4R5W2	Secondary or Main	5.80 5039 Asfáltica	Widen to 7m	2006	37.56	-	37.56	5.75
T4R4W2	Secondary or Main	2.00 5039 Asfáltica	Widen to 7m	2006	12.95	-	50.51	4.28
T4R5W3	Secondary or Main	6.40 5039 Asfáltica	Reconstruct 100	2006	41.44	-	91.95	3.46
T3R5W1	Secondary or Main	48.60 2139 Asfáltica	Reconstruct 100	2006	157.34	-	249.29	2.71
T4R2W2	Secondary or Main	5.60 5039 Asfáltica	Widen to 7m	2006	36.26	-	285.55	2.43
T3R5W2	Secondary or Main	2.00 2139 Asfáltica	Widen to 7m	2006	12.95	-	298.50	1.61
T3R5W3	Secondary or Main	4.40 2139 Asfáltica	Reconstruct 100	2006	28.49	-	326.99	1.06
T2R5W1A	Secondary or Main	36.90 1001 Asfáltica	Reconstruct 100	2006	119.46	-	446.45	1.01
T4R4W1	Secondary or Main	5.00 5403 Asfáltica	Widen to 7m	2007	32.38	-	478.83	6.23
T4R4W3	Secondary or Main	0.50 5403 Asfáltica	Rehab 110mm	2007	1.25	-	480.08	4.96
T4R3W1	Secondary or Main	5.90 5403 Asfáltica	Widen to 7m	2007	38.20	-	518.28	4.77
T4R3W2	Secondary or Main	3.60 5403 Asfáltica	Widen to 7m	2007	23.31	-	541.59	3.13
T3R4W2	Secondary or Main	4.60 2296 Asfáltica	Rehab 110mm	2007	9.03	-	550.62	2.56
T4R3W3	Secondary or Main	6.00 5403 Asfáltica	Rehab 110mm	2007	14.99	-	565.61	2.33
T4R2W3	Secondary or Main	13.60 5403 Asfáltica	30mm Overlay	2007	9.90	-	575.51	1.68
T3R4W3	Secondary or Main	1.00 2296 Asfáltica	Rehab 110mm	2007	2.50	-	578.01	1.30
T2R4W1	Secondary or Main	26.00 1073 Asfáltica	Rehab 110mm	2007	32.49	-	610.50	1.25
T2R2W2	Secondary or Main	10.40 1073 Asfáltica	20mm Overlay	2007	4.23	-	614.73	1.15

Ilustración 3-20 Resultado de alternativas para la optimización de los distintos escenarios presupuestales.

### 3.16 Resultados y análisis de los informes generados por HDM-4

Después de ejecutar el análisis, ahora es posible generar informes y realizar un control similar de los informes clave para asegurar las entradas de datos y que el modelado sea el esperado. Posteriormente estos deben ser examinados y verificados

Para el análisis de programas y estrategias existe una selección más amplia de informes útiles para el estudio del caso particular. A continuación, se presenta una lista de los tipos de informes generados por HDM-4.



*Ilustración 3-21 Resultados e informes generados por HDM-4 (Análisis de estrategias y programas)*

Uno de los objetivos de la realización del análisis de estrategias, es la asignación óptima de los recursos a las redes de carreteras dependiendo de los pronósticos de rendimiento, a corto o largo plazo de los distintos niveles de financiación, he identificar en toda la red las necesidades de recursos y los impactos del desarrollo de diversas opciones de conservación en el desempeño de la red carretera.

El objetivo del análisis puede ser definido como:

1. La determinación de los niveles de financiación necesarios para cumplir un conjunto de estándares de rendimiento de la red (la solución óptima sin restricciones, sin limitaciones de presupuesto).
2. La determinación de rendimiento de la red en los niveles de financiación dados, analizar los efectos de las limitaciones de los presupuestos en un período de 5 años en los niveles de servicio de red y la distribución del gasto en el mantenimiento, rehabilitación y obras de mejora.

Como primera parte de los resultados obtenidos del programa sin restricciones tenemos la optimización de las alternativas y los tipos de trabajos a realizar. En la siguiente tabla se presenta la lista de trabajos para el escenario presupuestal sin restricciones para los primeros 6 años:



*Tabla 3.21 Escenario presupuestal sin restricciones (Análisis de estrategias).*

Tramo	Longitud (km)	TDPA	Trabajos	Año de trabajos	VPN/C AP	Costo	Costo Acumulado
T4R5W1	11	5039	Amp. 7 m	2006	7.48	71.23	71.23
T4R4W1	5	5039	Amp. 7 m	2006	6.04	32.38	103.61
T4R5W2	5.8	5039	Amp. 7 m	2006	5.75	37.56	141.17
T4R3W1	5.9	5039	Amp. 7 m	2006	4.58	38.20	179.37
T4R4W2	2.0	5039	Amp. 7 m	2006	4.28	12.95	192.32
T4R5W3	6.4	5039	Rec. 100	2006	3.46	41.44	233.76
T4R3W2	3.6	5039	Amp. 7 m	2006	3.05	23.31	257.07
T4R2W2	5.6	5039	Amp. 7 m	2006	2.43	36.26	293.33
T3R5W1	48.6	2139	Amp. 7 m	2006	1.89	314.68	608.01
T3R5W2	2.0	2139	Amp. 7 m	2006	1.61	12.95	620.96
T3R4W1	19	2139	Amp. 7 m	2006	1.21	123.03	743.99
T3R5W3	4.4	2139	Rec. 100	2006	1.06	28.49	772.48
T2R5W1A	36.9	1001	Rec. 100	2006	1.01	119.46	891.94
T2R5W1B	36.9	1001	Rec. 100	2006	1.01	119.46	1011.40
T2R5W1C	36.9	1001	Rec. 100	2006	1.01	119.46	1130.86
T3R4W2	4.6	2139	Amp. 7 m	2006	0.98	29.79	1160.65
T1R5W1A	46.4	384	Rec. 40	2006	0.85	71.46	1232.11
T1R5W1C	46.4	384	Rec. 40	2006	0.85	71.46	1303.57
T1R5W1B	46.4	384	Rec. 40	2006	0.85	71.46	1375.03
T3R3W1	27.2	2139	Amp. 7 m	2006	0.69	176.12	1551.15
T2R5W2	1.2	1001	Rec. 100	2006	0.44	6.11	1557.26
T2R5W3	5.0	1001	Rec. 100	2006	0.28	32.38	1589.64
T4R4W3	0.5	5403	Reh. 110	2007	4.96	1.25	1590.89
T4R3W3	6.0	5403	Reh. 110	2007	2.33	14.99	1605.88
T4R2W3	13.6	5403	SobCar. 30	2007	1.68	9.90	1615.78
T3R4W3	1.0	2296	Rehab. 110	2007	1.30	2.50	1618.28



T2R4W1	26.0	1073	Rehab. 110	2007	1.25	32.49	1650.77
T2R2W2	10.4	1073	SobCar. 20	2007	1.15	4.23	1655.00
T2R2W1	48.8	1073	SobCar. 20	2007	1.14	12.64	1667.64
T2R2W3	5.0	1073	SobCar. 20	2007	1.14	2.59	1670.23
T1R2W1	51.2	412	SobCar. 20	2007	1.13	13.26	1683.49
T1R2W2	11.0	412	SobCar. 20	2007	1.11	4.48	1687.97
T1R2W3	25	412	SobCar. 20	2007	1.10	12.95	1700.92
T3R2W3A	46.7	2296	SobCar. 30	2007	1.08	34.00	1734.92
T3R2W3B	46.7	2296	SobCar. 30	2007	1.08	34.00	1768.92
T2R3W1	35	1073	Rehab. 110	2007	0.66	43.73	1812.65
T3R3W3	36.2	2296	Rehab. 110	2007	0.65	90.46	1903.11
T2R4W2	7.8	1073	Rehab. 110	2007	0.64	15.32	1918.43
T3R2W1A	26.6	2296	Amp. 7 m	2007	0.50	172.24	2090.67
T2R4W3	13.0	1073	Rehab. 110	2007	0.45	32.49	2123.16
T2R3W2	9.0	1073	Rehab. 110	2007	0.29	17.67	2140.83
T2R3W3	13.0	1073	Rehab. 110	2007	0.16	32.49	2173.32
T1R4W1	3.0	412	Rehab. 110	2007	0.11	3.75	2177.07
T4R1W3	13.0	5795	SobCar. 30	2008	2.15	9.46	2186.53
T1R5W2	8.0	442	Rec.40	2008	0.78	19.36	2205.89
T1R5W3	3.0	474	Rec.40	2009	0.82	9.24	2215.13
T3R1W3	21.0	2846	SobCar. 30	2010	0.01	15.29	2230.42
T2R1W1	12.0	1326	SobCar. 20	2010	0.01	3.11	2233.53
T1R3W1	7.0	509	Rehab. 110	2010	0.00	8.75	2242.28
T1R3W2	1.0	543	Rehab. 110	2011	0.00	1.96	2244.24
T1R3W3	3.0	543	Rehab. 110	2011	0.00	7.50	2251.74
T1R5W1A	46.4	1314	SobCar. 20	2025	0.85	12.02	3258.37



En la tabla anterior se observa una lista de los segmentos que componen la red de estudio, con su longitud y el TDPA. De acuerdo con el análisis de un presupuesto sin restricciones, tenemos una lista de los trabajos requeridos y su año de aplicación, el indicador VPN/CAP, el costo de cada trabajo y el costo acumulado donde al final suma un total de 3258.37 millones de pesos requeridos para la realización de las mejoras en esta red a lo largo de 20 años del período de análisis.

*Tabla 3.22 Escenario presupuestal medio (Análisis de estrategias).*

Tramo	Longitud (km)	TDPA	Trabajos	Año de trabajos	VPN/CAP	Costo	Costo Acumulado
<b>T4R5W2</b>	5.8	5039	Amp. 7 m	2006	5.75	37.56	37.56
<b>T4R3W1</b>	5.9	5039	Amp. 7 m	2006	4.58	38.20	75.76
<b>T4R4W2</b>	2.0	5039	Amp. 7 m	2006	4.28	12.95	88.71
<b>T4R5W3</b>	6.4	5039	Rec. 100	2006	3.46	41.44	130.15
<b>T3R5W1</b>	48.6	2139	Rec. 100	2006	2.71	157.34	287.49
<b>T3R5W2</b>	2.0	2139	Amp. 7 m	2006	1.61	12.95	300.44
<b>T3R5W3</b>	4.4	2139	Rec. 100	2006	1.06	28.49	328.93
<b>T2R5W2</b>	1.2	1001	Rec. 100	2006	0.44	6.11	335.04
<b>T4R4W1</b>	5.0	5403	Amp. 7 m	2007	6.23	32.38	367.42
<b>T4R4W3</b>	0.5	5403	Reh. 110	2007	4.96	1.25	368.67
<b>T3R4W1</b>	19.0	2296	Reh. 110	2007	4.07	23.74	392.41
<b>T3R4W2</b>	4.6	2296	Reh. 110	2007	2.56	9.03	401.44
<b>T4R2W2</b>	5.6	5403	Amp. 7 m	2007	2.55	36.26	437.70
<b>T4R3W3</b>	6.0	5403	Reh. 110	2007	2.33	14.99	452.69
<b>T3R3W1</b>	27.2	2296	Reh. 110	2007	1.74	33.99	486.68
<b>T4R2W3</b>	13.6	5403	SobCar. 30	2007	1.68	9.9	496.58
<b>T3R2W1A</b>	26.6	2296	SobCar. 30	2007	1.56	9.68	506.26
<b>T3R4W3</b>	1.0	2296	Reh. 110	2007	1.30	2.5	508.76
<b>T2R4W1</b>	26.0	1073	Reh. 110	2007	1.25	32.49	541.25
<b>T2R2W2</b>	10.4	1073	SobCar. 20	2007	1.15	4.23	545.48
<b>T2R2W1</b>	48.8	1073	SobCar. 20	2007	1.14	12.64	558.12
<b>T2R2W3</b>	5.0	1073	SobCar. 20	2007	1.14	2.59	560.71



<b>T1R2W1</b>	51.2	412	SobCar. 20	2007	1.13	13.26	573.97
<b>T1R2W2</b>	11.0	412	SobCar. 20	2007	1.11	4.48	578.45
<b>T1R2W3</b>	25.0	412	SobCar. 20	2007	1.10	12.95	591.40
<b>T3R2W3A</b>	47.7	2296	SobCar. 30	2007	1.08	34.0	625.40
<b>T3R2W3B</b>	3.0	2296	SobCar. 30	2007	1.08	34.0	659.40
<b>T1R4W1</b>	11.0	412	Reh. 110	2007	0.11	3.75	663.15
<b>T4R5W1</b>	3.6	5795	Amp. 7 m	2008	7.19	71.23	734.38
<b>T4R3W2</b>	13.0	5795	Amp. 7 m	2008	3.20	23.31	757.69
<b>T4R1W3</b>	46.4	5795	SobCar. 30	2008	2.15	9.46	767.15
<b>T1R5W1A</b>	46.4	442	Rec. 40	2008	1.0	71.467	838.61
<b>T1R5W1B</b>	46.4	442	Rec. 40	2008	1.0	71.46	910.07
<b>T1R5W1C</b>	7.8	442	Rec. 40	2008	1.0	71.46	981.53
<b>T2R4W2</b>	8.0	1151	Reh. 110	2008	0.56	15.32	996.85
<b>T1R5W2</b>	3.0	474	Rec. 40	2009	0.87	19.36	1016.21
<b>T1R5W3</b>	36.9	474	Rec. 40	2009	0.82	9.24	1025.45
<b>T2R5W1B</b>	36.9	1235	Rec. 100	2009	0.71	119.46	1144.91
<b>T2R5W1A</b>	36.9	1235	Rec. 100	2009	0.71	119.46	1264.37
<b>T2R3W1</b>	35.0	1235	Reh. 110	2009	0.46	43.73	1308.10
<b>T2R3W2</b>	9.0	1235	Reh. 110	2009	0.22	17.67	1325.77
<b>T2R5W1C</b>	36.9	1326	Rec. 100	2010	0.44	119.46	1445.23
<b>T3R3W3</b>	36.2	2846	Reh. 110	2010	0.27	90.46	1535.69
<b>T2R5W3</b>	5.0	1326	Rec. 100	2010	0.18	32.38	1568.07
<b>T2R4W3</b>	13.0	1326	Reh. 110	2010	0.17	32.49	1600.56
<b>T2R3W3</b>	13.0	1326	Reh. 110	2010	0.06	32.49	1633.05
<b>T3R1W3</b>	21.0	2846	SobCar. 30	2010	0.01	15.29	1648.34
<b>T2R1W1</b>	12.0	1326	SobCar. 20	2010	0.01	3.11	1651.45
<b>T1R3W1</b>	7.0	509	Reh. 110	2010	0.0	8.75	1660.20
<b>T1R3W3</b>	3.0	543	Reh. 110	2011	0.0	7.5	1667.70



Analizando rápidamente el impacto de las restricciones presupuestarias tenemos que el número de tramos priorizados para realizar trabajos se ve disminuido ajustándose al presupuesto asignado para cada periodo. De manera que la intención de una restricción presupuestaria es definir un techo presupuestario.

*Tabla 3.23 Escenario presupuestal bajo (Análisis de estrategias)*

Tramo	Longitud (km)	TDPA	Trabajos	Año de trabajos	VPN/C AP	Costo	Costo Acumulado
T4R5W1	11.0	5039	Amp. 7 m	2006	7.48	71.23	71.23
T4R4W1	5.0	5039	Amp. 7 m	2006	6.04	32.38	103.61
T4R5W2	5.8	5039	Amp. 7 m	2006	5.75	37.56	141.17
T4R3W1	5.9	5039	Amp. 7 m	2006	4.58	38.2	179.37
T4R5W3	6.4	5039	Rec. 100	2006	3.46	41.44	220.81
T4R4W3	0.5	5403	Reh. 110	2007	4.96	1.25	222.06
T4R4W2	2.0	5403	Amp. 7 m	2007	4.35	12.95	235.01
T3R4W1	19.0	2296	Reh. 110	2007	4.07	23.74	258.75
T4R3W2	3.6	5403	Amp. 7 m	2007	3.13	23.31	282.06
T3R4W2	4.6	2296	Reh. 110	2007	2.56	9.03	291.09
T4R3W3	6.0	5403	Reh. 110	2007	2.33	14.99	306.08
T4R2W3	13.6	5403	SobCar. 30	2007	1.68	9.9	315.98
T3R5W2	2.0	2296	Amp. 7 m	2007	1.59	12.95	328.93
T3R2W1A	26.6	2296	SobCar. 30	2007	1.56	9.68	338.61
T3R4W3	1.0	2296	Reh. 110	2007	1.30	2.5	341.11
T2R4W1	26.0	1073	Reh. 110	2007	1.25	32.49	373.60
T2R2W3	5.0	1073	SobCar. 20	2007	1.14	2.59	376.19
T3R2W3A	46.7	2296	SobCar. 30	2007	1.08	34.0	410.19
T3R2W3B	46.7	2296	SobCar. 30	2007	2.28	34.0	444.19
T3R5W1	48.6	2465	Rec. 100	2008	2.15	157.34	601.53
T4R1W3	13.0	5795	SobCar. 30	2008	1.16	9.46	610.99
T1R2W3	25.0	442	SobCar. 20	2008	1.15	12.95	623.94
T1R2W2	11.0	442	SobCar. 20	2008	1.13	4.48	628.42



<b>T1R2W1</b>	51.2	442	SobCar. 20	2008	1.04	13.26	641.68
<b>T2R2W2</b>	10.4	1151	SobCar. 20	2008	0.91	4.23	645.91
<b>T2R2W1</b>	48.8	1151	SobCar. 20	2008	0.41	12.64	658.55
<b>T2R5W2</b>	1.2	1151	Rec. 100	2008	0.11	6.11	664.66
<b>T1R4W1</b>	3.0	442	Reh. 110	2008	2.8	3.75	668.41
<b>T4R2W2</b>	5.6	6218	Amp. 7 m	2009	1.18	36.26	704.67
<b>T3R3W1</b>	27.2	2648	Reh. 110	2009	1.04	33.99	738.66
<b>T1R5W1A</b>	46.4	474	Rec. 40	2009	1.04	71.46	810.12
<b>T1R5W1B</b>	46.4	474	Rec. 40	2009	0.82	71.46	881.58
<b>T1R5W3</b>	3.0	474	Rec. 40	2009	1.05	9.24	890.82
<b>T1R5W1C</b>	46.4	509	Rec. 40	2010	0.95	71.46	962.28
<b>T1R5W2</b>	8.0	509	Rec. 40	2010	0.48	19.36	981.64
<b>T3R5W3</b>	4.4	2846	Rec. 100	2010	0.27	28.49	1010.13
<b>T3R3W3</b>	36.2	2846	Reh. 110	2010	0.01	90.46	1100.59
<b>T2R1W1</b>	12.0	1326	SobCar. 20	2010	0.00	3.11	1103.70
<b>T1R3W1</b>	7.0	509	Reh. 110	2010	0.00	8.75	1112.45
<b>T1R3W2</b>	1.0	543	Reh. 110	2011	0.00	1.96	1114.41
<b>T1R3W3</b>	3.0	543	Reh. 110	2011	0.00	7.5	1121.91
<b>T2R3W1</b>	35.0	1416	Reh. 110	2011	0.00	43.73	1165.64
<b>T2R3W2</b>	9.0	1416	Reh. 110	2011	0.00	17.67	1183.31
<b>T2R3W3</b>	13.0	1416	Reh. 110	2011	0.00	32.49	1215.80
<b>T2R4W2</b>	7.8	1416	Reh. 110	2011	0.00	15.32	1231.12
<b>T2R4W3</b>	13.0	1416	Reh. 110	2011	0.00	32.49	1263.61
<b>T2R5W1A</b>	36.9	1416	Rec. 100	2011	0.00	119.46	1383.07
<b>T2R5W3</b>	5.0	1416	Rec.100	2011	0.00	32.38	1415.45
<b>T3R1W3</b>	21.0	3045	SobCar. 30	2011	0.00	15.29	1430.74
<b>T2R5W1B</b>	36.9	1416	Rec. 100	2011	0.00	119.46	1550.20
<b>T2R5W1C</b>	36.9	1416	Rec. 100	2011	0.00	119.46	1669.66



Si realizáramos una sumatoria de los montos de inversión acumulados para los años donde se realizaron las restricciones presupuestarias, veríamos que cuando más bajo es el presupuesto los trabajos de conservación y mejora, se ven disminuidos para así cumplir con las exigencias de las restricciones.

Habiendo optimizado el programa de mejoramiento sujeto a restricciones presupuestarias y calculado los montos de inversión necesarios para mantener determinada red de carretera con cierto nivel de servicio podemos analizar de los informes generados por HDM-4 y así poder definir con claridad los resultados.

### Tablas de indicadores económicos.

HDM-4 evalúa las alternativas con el indicador VPN/CAP, comparando con otras alternativas y diferentes años arrojando como resultado el valor más alto para VPN/CAP, a través de este resumen observamos claramente cómo se realiza la comparación de la alternativa con los diferentes indicadores como el costo de las alternativas, los ahorros en los COV, el VPN, la relación VPN/CAP y la TIR.

Tabla 3.24 Indicadores económicos para el tramo T1R2W1.

Tramo: T1R2W1									
Sensibilidad: No se realizó análisis de sensibilidad									
Alternativa	Valor presente de los costos totales de la agencia (RAC)	Valor presente de los costos de inv. de la agencia (CAP)	Incremento en costos de la agencia (C)	Decremento en costos de usuario (B)	Beneficios exógenos netos (E)	Valor presente neto (VPN = B + E - C)	Relación VPN/costo (VPN/RAC)	Relación VPN/costo (VPN/CAP)	Tasa interna de retorno (TIR)
Base Alternativa	35.178	35.178	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
REH_1	17.028	17.028	-18.147	1.018	0.000	19.165	1.125	1.125	53.8 (1)
REH_2	16.169	16.169	-19.006	-0.786	0.000	18.220	1.127	1.127	74.1 (1)
REH_3	48.825	48.825	13.649	6.506	0.000	-7.144	-0.148	-0.148	-37.0 (2)
REH_4	43.751	43.751	8.575	4.440	0.000	-4.135	-0.095	-0.095	-40.1 (2)
REH_5	39.221	39.221	4.045	2.284	0.000	-1.761	-0.045	-0.045	-43.7 (2)
REN_1	17.028	17.028	-18.147	1.018	0.000	19.165	1.125	1.125	53.8 (1)
REN_2	17.028	17.028	-18.147	1.018	0.000	19.165	1.125	1.125	53.8 (1)
REN_3	16.169	16.169	-19.006	-0.786	0.000	18.220	1.127	1.127	74.1 (1)
REN_4	14.905	14.905	-20.270	-3.408	0.000	16.862	1.131	1.131	128.7 (1)
REN_5	35.178	35.178	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	Sin solución

En la tabla 3.24, tenemos en la primera columna la alternativa seguida del costo en mdp, en la cuarta columna se nos presenta la diferencia entre las alternativas propuestas y la alternativa base, los ahorros por COV se presentan en la columna, decrementos en costos de usuarios. El VPN es el total en mdp de los beneficios generados por esa obra, la relación VPN/CAP es el indicador preferido ya que representa de una forma fácil la rentabilidad de los proyectos, cuando se obtienen valores negativos que nos indican que no son rentables estas alternativas por que se invierte más de los beneficios que se pudieran obtener, los valores de cero indican que no obtenemos beneficios económicos, de los valores positivos podemos observar que aunque sea el mismo tipo de alternativa la diferencia para que una resulte con mayor rentabilidad que otro.

Este tramo en específico tiene como resultado una alternativa de renivelación (REN\_4) con un valor VPN/CAP = 1.131 y una TIR de 126.7

Tabla 3.25 Indicadores económicos para el tramo T4R5W2.

Tramo: T4R5W2									
Sensibilidad: No se realizó análisis de sensibilidad									
Alternativa	Valor presente de los costos totales de la agencia (RAC)	Valor presente de los costos de inv. de la agencia (CAP)	Incremento en costos de la agencia (C)	Decremento en costos de usuario (B)	Beneficios exógenos netos (E)	Valor presente neto (VPN = B + E - C)	Relación VPN/costo (VPN/RAC)	Relación VPN/costo (VPN/CAP)	Tasa interna de retorno (TIR)
Base Alternativa	15.775	15.740	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
REC_1	26.234	26.234	10.459	129.685	0.000	119.226	4.545	4.545	119.9 (1)
REC_2	23.582	23.547	7.807	107.867	0.000	100.060	4.243	4.249	143.4 (1)
REC_3	20.965	20.931	5.191	81.770	0.000	76.580	3.653	3.659	163.6 (1)
REC_4	18.829	18.595	2.855	53.570	0.000	50.715	2.722	2.727	175.6 (1)
REC_5	16.543	16.509	0.769	25.984	0.000	25.215	1.524	1.527	185.1 (1)
WID_1	35.433	35.433	19.668	223.213	0.000	203.614	5.746	5.746	112.1 (1)
WID_2	32.047	32.013	16.273	197.041	0.000	180.769	5.641	5.647	131.8 (1)
WID_3	28.498	28.464	12.724	166.530	0.000	153.806	5.397	5.404	149.1 (1)
WID_4	25.330	25.295	9.555	133.911	0.000	124.356	4.910	4.916	159.8 (1)
WID_5	22.500	22.465	6.725	101.890	0.000	95.164	4.229	4.236	166.4 (1)

En la table 3.25 observamos que todas las alternativas son rentables siendo la mejor opción es WID\_1 cuyo trabajo de mejora es una ampliación de 7.0m con un VPN de 203.614 mdp y una TIR de 112.1.

### Irregularidad promedio por alternativa para cada tramo

Como resumen del comportamiento de la regularidad para cada tramo se observan tres tipos de gráficas representativas, donde cada tipo de trabajo define un comportamiento en particular.

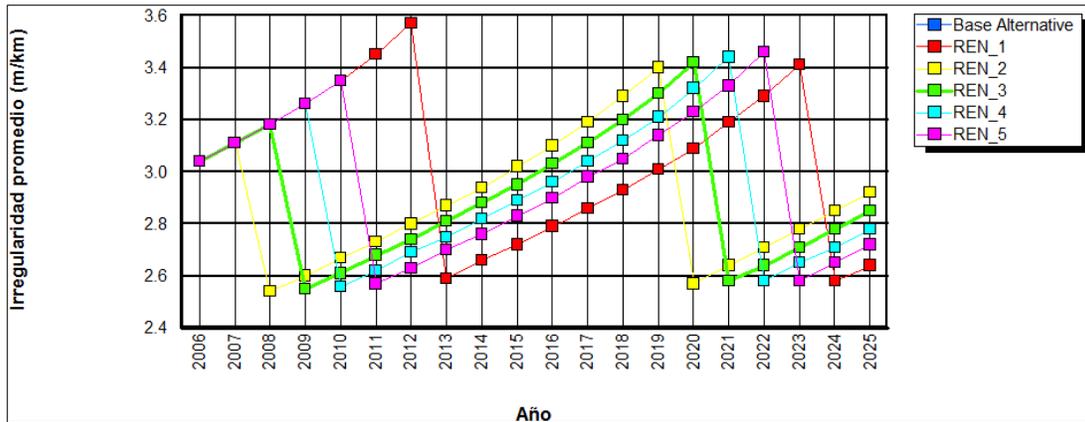


Ilustración 3-22 Gráfica de la irregularidad promedio para el tramo T1R1W1.

En esta primera gráfica observamos el Tramo T1R1W1 con trabajos de renovación ya sea de 20, 30 o 40mm dependiendo de los criterios de intervención que mantienen el IRI por debajo de 2.6, un valor deducido por HDM-4 de acuerdo con la calibración de reducción de irregularidad después de los trabajos realizados.

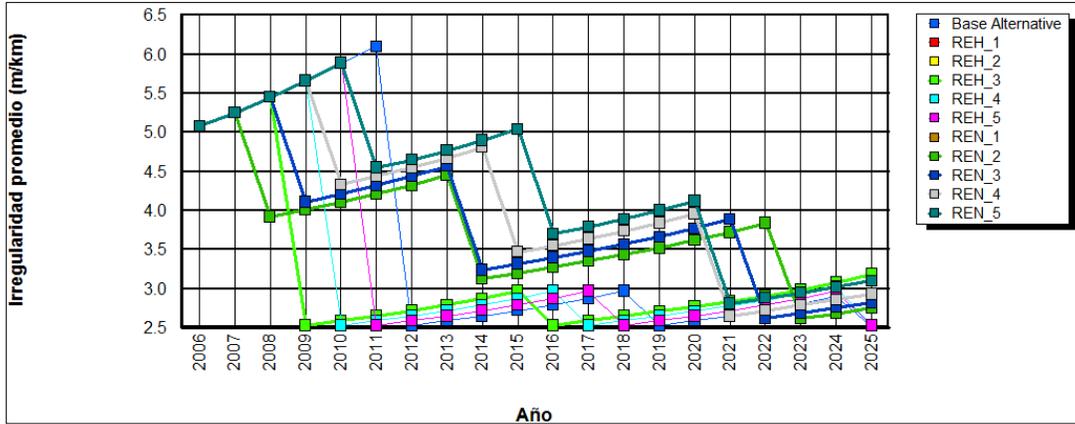


Ilustración 3-23 Gráfica de la irregularidad promedio para el tramo T1R2W3.

El tramo T1R2W3 muestra como alternativas trabajos de rehabilitación (REH) y renivelación (REN) que mantienen las condiciones de regularidad de manera distinta, ya que los trabajos de rehabilitación comienzan a partir del 2008 y reducen el IRI hasta un valor de 2.5 y que después lo mantienen por debajo de 3 mientras que los trabajos de renivelación bajan de manera progresiva.

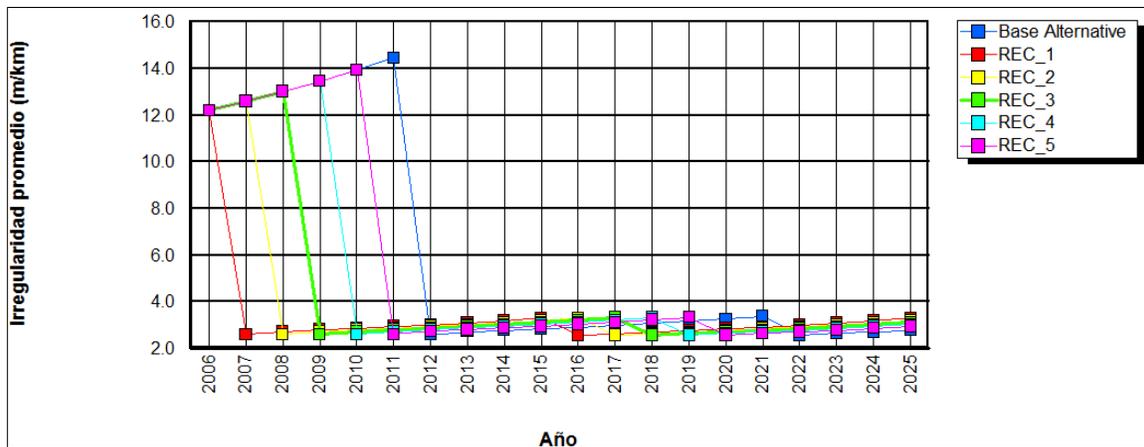


Ilustración 3-24 Gráfica de la irregularidad promedio para el tramo T1R4W1A.

Ahora tenemos trabajos de reconstrucción que son realizados en el tramo T1R4W1A donde observamos la diferencia en el año de su aplicación y la reducción del IRI hasta un valor de 2.5.

A continuación, se presenta una lista de trabajos a realizar por escenario presupuesta alto y bajo.



Tabla 3.26 Trabajos para un escenario presupuestal alto.

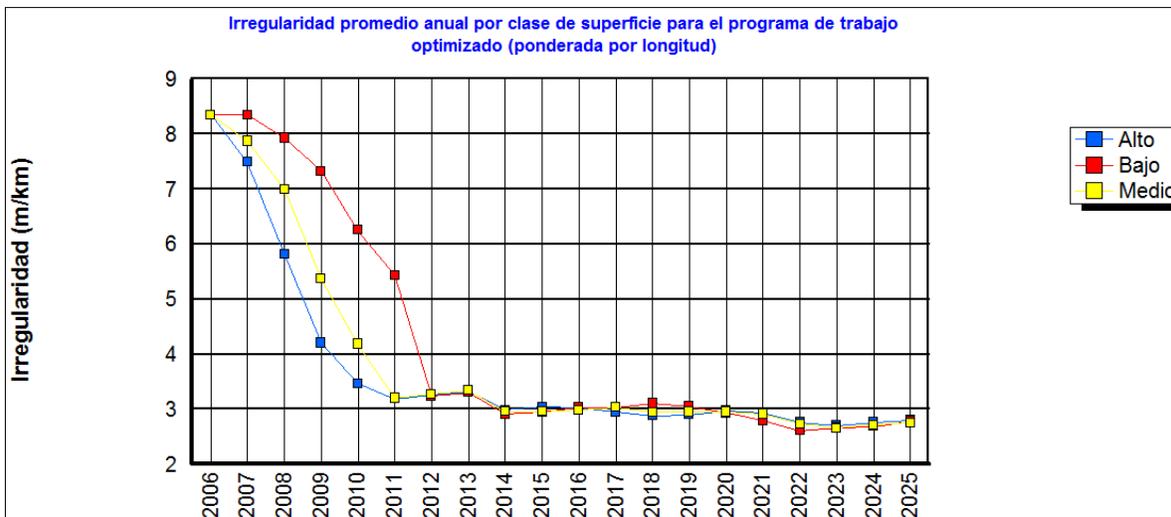
Escenario presupuestal:		High							
Tramo	Tipo de carretera	Longitud (km)	TDPA inicial	Clase de superficie	Descripción de la alternativa	Irregularidad promedio IRI	Costos financieros de inv. de la agencia (Actualizados)	Costos financieros recurr. de la agencia (Actualizados)	Valor presente neto
T1R1W1	Secondary or Main	4.400	385	Asfáltica	Base Alternative	3.04	0.74	0.00	0.00
T1R1W2	Secondary or Main	4.000	385	Asfáltica	Base Alternative	3.02	1.06	0.00	0.00
T1R2W1	Secondary or Main	51.200	385	Asfáltica	REN_1	3.75	20.00	0.00	19.16
T1R2W2	Secondary or Main	11.000	385	Asfáltica	REN_1	3.73	6.75	0.00	6.37
T1R2W3	Secondary or Main	25.000	385	Asfáltica	REN_1	3.73	19.53	0.00	18.27
T1R3W1	Secondary or Main	7.000	385	Asfáltica	REH_5	3.93	6.38	0.02	0.00
T1R3W2	Secondary or Main	1.000	385	Asfáltica	Base Alternative	4.21	1.28	0.00	0.00
T1R3W3	Secondary or Main	3.000	385	Asfáltica	Base Alternative	4.21	4.88	0.01	0.00
T1R4W1	Secondary or Main	3.000	385	Asfáltica	REH_4	4.09	3.06	0.01	0.24
T1R5W1A	Secondary or Main	46.400	385	Asfáltica	REC_2	3.86	67.67	0.31	55.82
T1R5W1B	Secondary or Main	46.400	385	Asfáltica	REC_2	3.86	67.67	0.31	55.82
T1R5W1C	Secondary or Main	46.400	385	Asfáltica	REC_3	4.35	60.42	0.31	52.60
T1R5W2	Secondary or Main	8.000	385	Asfáltica	REC_3	4.35	16.37	0.05	11.07
T1R5W3	Secondary or Main	3.000	385	Asfáltica	REC_4	4.86	6.98	0.02	4.95
T2R1W1	Secondary or Main	12.000	1,002	Asfáltica	REH_5	2.92	2.87	0.00	0.01
T2R1W2	Secondary or Main	2.200	1,002	Asfáltica	Base Alternative	3.01	0.66	0.00	0.00
T2R2W1	Secondary or Main	48.800	1,002	Asfáltica	REN_1	3.80	20.25	0.00	19.69
T2R2W2	Secondary or Main	10.400	1,002	Asfáltica	REN_1	3.72	6.78	0.00	6.66
T2R2W3	Secondary or Main	5.000	1,002	Asfáltica	REN_1	3.70	4.15	0.00	4.01
T2R3W1	Secondary or Main	35.000	1,002	Asfáltica	REH_4	3.66	36.37	0.08	14.15
T2R3W2	Secondary or Main	9.000	1,002	Asfáltica	REH_3	3.37	16.46	0.02	3.60



Tabla 3.27 Trabajos para un escenario presupuestal bajo.

Escenario presupuestal:		Low								
Tramo	Tipo de carretera	Longitud (km)	TDPA inicial	Clase de superficie	Descripción de la alternativa	Irregularidad promedio IRI	Costos financieros de inv. de la agencia (Actualizados)	Costos financieros recurr. de la agencia (Actualizados)	Valor presente neto	
T1R1W1	Secondary or Main	4.400	385	Asfáltica	Base Alternative	3.04	0.74	0.00	0.00	
T1R1W2	Secondary or Main	4.000	385	Asfáltica	Base Alternative	3.02	1.06	0.00	0.00	
T1R2W1	Secondary or Main	51.200	385	Asfáltica	REN_3	3.87	18.99	0.00	18.22	
T1R2W2	Secondary or Main	11.000	385	Asfáltica	REN_3	3.84	6.41	0.00	6.28	
T1R2W3	Secondary or Main	25.000	385	Asfáltica	REN_3	3.83	18.55	0.00	18.23	
T1R3W1	Secondary or Main	7.000	385	Asfáltica	REH_5	3.93	6.38	0.02	0.00	
T1R3W2	Secondary or Main	1.000	385	Asfáltica	Base Alternative	4.21	1.28	0.00	0.00	
T1R3W3	Secondary or Main	3.000	385	Asfáltica	Base Alternative	4.21	4.88	0.01	0.00	
T1R4W1	Secondary or Main	3.000	385	Asfáltica	REH_3	3.72	3.43	0.01	0.31	
T1R5W1F	Secondary or Main	48.400	385	Asfáltica	REC_4	4.87	53.95	0.31	48.47	
T1R5W1E	Secondary or Main	48.400	385	Asfáltica	REC_4	4.87	53.95	0.31	48.47	
T1R5W1C	Secondary or Main	48.400	385	Asfáltica	REC_5	5.42	48.17	0.31	43.47	
T1R5W2	Secondary or Main	8.000	385	Asfáltica	REC_5	5.40	13.05	0.05	10.67	
T1R5W3	Secondary or Main	3.000	385	Asfáltica	REC_4	4.86	6.98	0.02	4.95	
T2R1W1	Secondary or Main	12.000	1,002	Asfáltica	REN_5	2.92	2.87	0.00	0.01	
T2R1W2	Secondary or Main	2.200	1,002	Asfáltica	Base Alternative	3.01	0.66	0.00	0.00	
T2R2W1	Secondary or Main	48.800	1,002	Asfáltica	REH_2	3.89	19.43	0.00	15.09	
T2R2W2	Secondary or Main	10.400	1,002	Asfáltica	REN_3	3.82	6.51	0.00	5.73	
T2R2W3	Secondary or Main	5.000	1,002	Asfáltica	REH_1	3.70	4.15	0.00	4.01	
T2R3W1	Secondary or Main	35.000	1,002	Asfáltica	Base Alternative	4.23	29.94	0.08	0.00	
T2R3W2	Secondary or Main	9.000	1,002	Asfáltica	Base Alternative	4.20	12.10	0.02	0.00	

De las tablas presentadas anteriormente podemos observar dos principales diferencias. Respecto a la irregularidad promedio que se presenta para cada tramo, observamos que cuando se tiene un presupuesto bajo tenemos valores de IRI más altos, las alternativas para los tramos para un presupuesto bajo o alto son las mismas en un 90% con la diferencia del año de aplicación de los trabajos, esto quiere decir que cuando se tiene un presupuesto bajo los trabajos se realizarán después a diferencia de un presupuesto alto.



*Ilustración 3-25 Gráfica de la irregularidad promedio para la red de carreteras por escenario presupuestal.*

*Tabla 3.28 Comparación del comportamiento de la irregularidad promedio por escenario presupuestal.*

Escenario Presupuestal	Valores de IRI por año				
	2007	2008	2009	2010	2011
<b>Bajo</b>	8.4	7.9	7.3	6.2	5.5
<b>Medio</b>	7.9	7.0	5.4	4.2	3.1
<b>Alto</b>	7.5	5.8	4.1	3.4	3.1

Un presupuesto bajo representa valores de IRI elevados y que trae consigo costos de operación vehicular elevados, mientras se cuenta con un presupuesto mayor, se tendrá como resultado la disminución de la rugosidad. Un presupuesto medio, se comporta de manera similar que un presupuesto alto, obteniendo así los beneficios de un IRI aceptable a menor costo.

## Resumen de la condición del pavimento por escenario presupuestal

Área dañada promedio anual por código de red carretera para el programa de trabajo optimizado

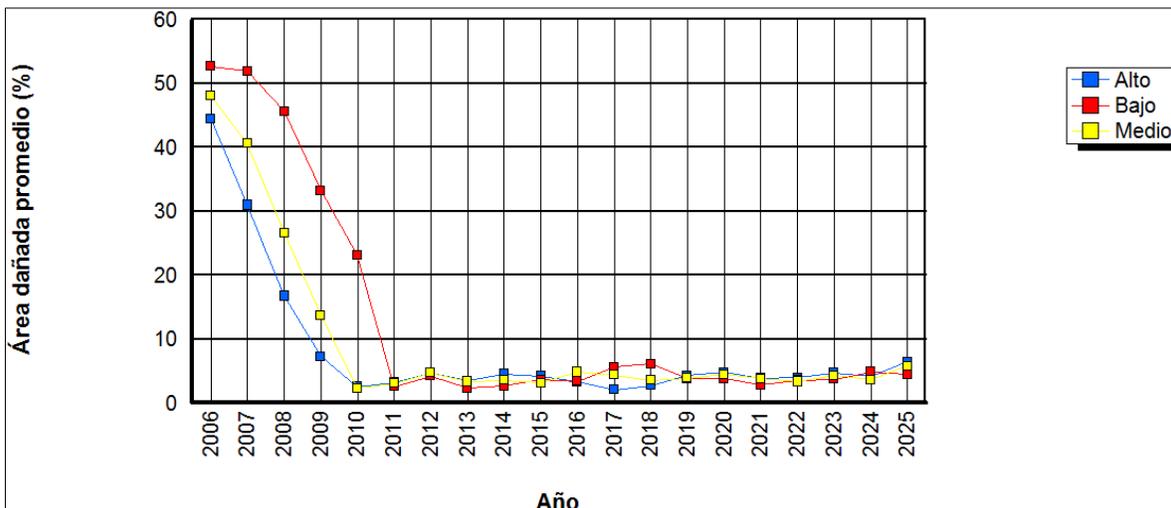


Ilustración 3-26 Gráfica del área dañada promedio por escenario presupuestal.

Tabla 3.29 Comparativa del área dañada promedio por escenario presupuestal

Escenario Presupuestal	Área dañada promedio (%)				
	2006	2007	2008	2009	2010
Bajo	53	52	46	33	22
Medio	48	40	26	13	3
Alto	45	30	18	8	3

De la gráfica y tabla anterior se percibe el comportamiento del área dañada correspondiente a la red de carreteras respecto a cierto presupuesto, al igual que la rugosidad, un presupuesto bajo representa altos porcentajes de área dañada en consecuencia mayores costos de operación vehicular y una red insegura. Ahora bien, la comparación entre los presupuestos medio y alto, tenemos que podemos obtener la disminución del área dañada a costos muy elevados correspondientes a un escenario presupuestal medio que es lo más favorable.

### Resultados del análisis por escenario presupuestario

En la tabla 3.30 el costo total acumulado se toma en cuenta hasta el 2010, que la restricción presupuestaria toma en cuenta los primeros 5 años y posteriormente se analiza como un presupuesto sin restricciones.



*Tabla 3.30 Comparativa entre los escenarios presupuestales.*

Presupuesto	Costo Total Acumulado	Trabajos				VPN/CAP Promedio
		REN	REH	REC	WID	
Alto	2064.18	12	13	13	11	1.64
Medio	1660.20	13	15	13	8	1.72
Bajo	1112.45	12	10	9	8	2.04

### **3.17 Conclusiones del uso de estándares de mejora y nueva construcción en análisis de estrategias y programas**

- ✓ Uno de los principales objetivos era el de obtener una lista de los trabajos de conservación y mejora con un presupuesto sin restricciones, que serían necesarios para que esta red de carreteras pudiera mejorar su condición. Tabla 3.19.
- ✓ Se determinaron las necesidades de la red con las soluciones óptimas sin limitaciones de presupuesto. Tabla 3.19
- ✓ De acuerdo con los análisis de las limitaciones del presupuesto y su impacto sobre la red carretera, obtenemos que la solución óptima es un escenario presupuestal medio.

*Tabla 3.31 Resultados de la evaluación técnico - económica (Análisis de estrategias).*

Indicadores de Evaluación	Escenario Presupuestario
Condiciones de IRI para la red carretera	Medio
Área dañada promedio	Medio
Análisis por escenario presupuestario	Medio y Alto

En este análisis de estrategias se definieron tres escenarios de financiación que de acuerdo a los trabajos necesarios para la realización de la conservación y mejora de la red carretera, los informes generados por HDM-4 y un exhaustivo análisis de los efectos de las limitaciones presupuestarias un presupuesto medio de 1660.20 millones de pesos es la mejor opción para mantener cubiertas las necesidades en los primeros 5 años de la administración satisfaciendo una buena conservación de la carretera sin que los costos de operación vehicular se lleguen a incrementar.



## Capítulo 4 Estudio de caso: Análisis del ciclo de vida de un proyecto de reconstrucción

La evaluación del libramiento noreste de Querétaro presenta el análisis económico de un proyecto para mejorar una carretera de concreto hidráulico. La cual tiene una longitud de 37 km de largo con una topografía que va de terreno plano a lomerío suave medio. Para el análisis de la carretera se ha dividido en tramos homogéneos con ayuda del Sistema de Gestión de Pavimentos (SGP) basados en las deflexiones obtenidas del Deflectómetro de Impacto Dynatest, el Índice de Regularidad superficial IRI con Perfilómetro Laser, la geometría, condiciones de pavimento, composición vehicular y el volumen de tránsito.

El propósito del análisis es evaluar los beneficios económicos de la inversión propuesta para el estándar de mejora. La viabilidad económica del proyecto que se evalúa mediante la comparación de la alternativa de proyecto base (conservación normal de la carretera de concreto) y las mejoras a realizar como lo es la reconstrucción del tramo de concreto hidráulico y reconstrucción con mezcla asfáltica). Y proponer las acciones de mejora para conservar el nivel de servicio requerido por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes buscando así que los costos de operación vehicular (COV) se mantengan en niveles bajos y no tiendan a elevarse.

Este proyecto presenta una forma de evaluación alternativa, ya que HDM-4 no cubre las necesidades para la evaluación económica de una reconstrucción o modernización sobre pavimento de concreto. En primera instancia, se observó la manera de hacer modificaciones en la base de datos exportando los estándares de trabajo, abriendo la información en Access y en la tabla de “improves” se cambió el tipo de pavimento a concreto (opción que no se encuentra dentro de la plataforma de HDM-4). El esquema de análisis se realizó con los estándares de conservación y mejora, se corrió el programa y a la hora de observar las tablas de resultados se vieron incongruencias entre las gráficas de irregularidad y los resúmenes de trabajos realizados así como las tablas de resultados donde se muestra la condición de la carretera antes y después de las alternativas dando como resultado que este tipo de análisis cuando se trata de modernizar o reconstruir una carretera de concreto hidráulico no se puede realizar dentro del entorno de HDM-4.

Ahora bien, para poder llevar a cabo el análisis de este proyecto, se optó por realizar las corridas en HDM-4 por separado de la alternativa base, conservación rutinaria y periódica comparando la reconstrucción de una sobrecarpeta de asfalto y la alternativa de una sobrecarpeta de concreto hidráulico. Una vez hecho esto se extrajeron los datos obtenidos para realizar una base de datos llamada “Consulta RunData” que contiene información sobre las características de evaluación de las alternativas “base, asfalto y concreto” contenidas en las tablas “AnnualData\_”, las tablas “Options\_” tiene información sobre los estándares de conservación o mejora para las alternativas y las tablas “Sections\_” comprende información sobre las características de los tramos o secciones a evaluar, dentro de “Consulta RunData” se crearon *Consultas* para los flujos y los indicadores económicos de las alternativas que posteriormente nos servirán para realizar la comparación económica realizada desde el software Microsoft Excel.

#### 4.1 Descripción y detalles del proyecto

El libramiento Noreste de Querétaro es una autopista de cuatro carriles construida con base en dos secciones tipo. La primera comprende el tramo ubicado entre el km 0+000 y el km 9+000 compuesta por dos cuerpos con un ancho de corona de 10.5m, separados por una franja central con un ancho variable del orden de 10m. La segunda sección es de un solo cuerpo con 21m de ancho de corona dividido por un muro de contención fabricado de concreto utilizado como separación central, de manera que cada sentido de circulación tiene un ancho de calzada de 7.0m donde esta sección va del km 9+000 hasta el km 37+000. Para la evaluación del tramo se dividió en dos cuerpos (cuerpo A y cuerpo B), que separan el sentido de circulación del tránsito.



### 4.1.1 Estructura del pavimento para la alternativa de concreto hidráulico

La estructura del pavimento existente está conformada por una capa de concreto hidráulico de 28cm, donde la alternativa contempla una capa de mezcla asfáltica de 5cm y una nueva capa de concreto hidráulico de 35 cm que podemos observar en la ilustración 4.1.

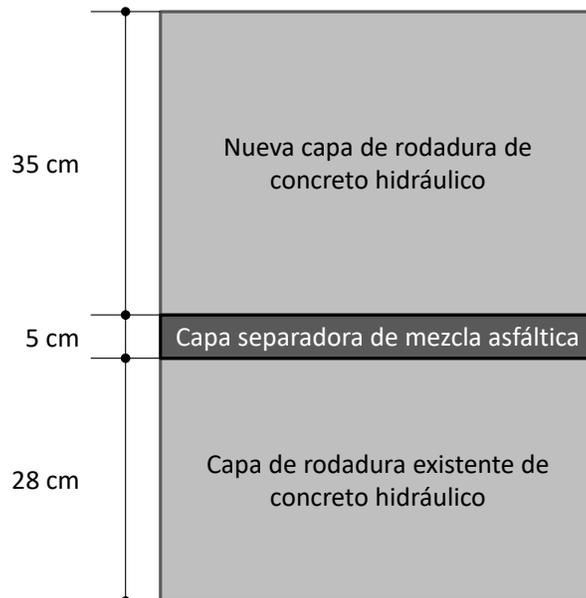


Ilustración 4-1 Diseño para la alternativa de concreto hidráulico.

Se realizaron dos corridas en HDM-4, la primera donde se obtiene el modelo de deterioro con las condiciones actuales, para así obtener los costos para la alternativa base de conservación rutinaria y otra segunda corrida donde las características son de un concreto hidráulico con una regularidad superficial igual a 1.5, agrietamiento y deflexiones igual a cero ya que se trata de una superficie nueva.

Tabla 4.1 Datos de pavimento para el análisis con HDM-4 de la opción de pavimento de concreto hidráulico.

Variable	Valor
Tipo de pavimento	Pavimento de concreto simple con juntas (JPCP)
Espesor de la capa superficial	350 mm
Longitud de las losas	4.5 m
Espesor de la base	280 mm
Módulo de la base	2,000 MPa
Año de construcción	2013
Datos de temperatura de las losas	Valores por omisión de HDM-4

## 4.1.2 Estructura del pavimento para la alternativa de mezcla asfáltica

Al igual que en la alternativa de concreto hidráulico, el análisis se efectuó en forma externa, realizando una primera corrida con las condiciones actuales del pavimento y una segunda corrida con los datos de pavimento para el análisis de esta opción con HDM-4 quedando como se muestra en la Figura 2. 13

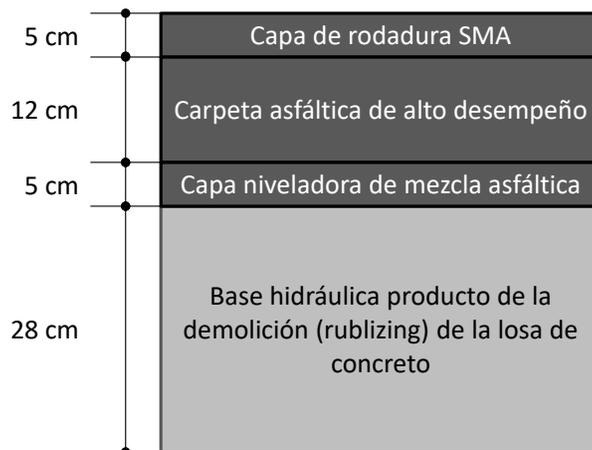


Ilustración 4-2 Diseño para la alternativa de pavimento asfáltico.

Tabla 4.2 Datos de pavimento para el análisis con HDM-4 de la opción de pavimento asfáltico.

Variable	Valor
Tipo de pavimento	Mezcla asfáltica sobre pavimento asfáltico (AMAP)
Tipo de material	SMA
Espesor más reciente	50 mm
Espesor anterior	120 mm
Número estructural de las capas superiores	4.92
CBR de la subrasante	50%
Número estructural ajustado	7.00
Estación	Seca
Año de ejecución de los trabajos más recientes	2011

## 4.2 Configuración de HDM-4

Antes de comenzar a insertar datos para el análisis del proyecto, es necesario definir algunos parámetros de calibración, entre paréntesis, se indica la subcategoría de información en la que se definen estos datos dentro de HDM-4.

- Régimen horario del tránsito a lo largo del año (modelos de tránsito).
- Capacidad de los tramos para acomodar el flujo vehicular (tipo de velocidad/capacidad)



- Siniestralidad) (tipos de accidentes)
- Zonas climáticas por las que discurre la carretera (zonas climáticas)
- Calibración de los modelos de deterioro de HDM-4 (series y juegos de calibración)

### Modelos de tránsito

Para este proyecto no se cuentan con datos que nos ayuden a determinar un modelo de tránsito específico para el tramo, por ello se optó emplear por un modelado de flujo libre (Free-Flow) precargado en HDM-4, el cual supone que el flujo horario medio se distribuye de forma uniforme durante todo el día, los vehículos no interactúan entre si evitando efectos de congestión que pudieran repercutir en la velocidad y los costos de operación vehicular.

### Tipos de velocidad/capacidad

En cuanto al tipo de velocidad/capacidad, se utilizaron los datos por omisión que HDM-4 provee para una carretera de cuatro carriles, los cuales se encuentran agrupados en el tipo de velocidad/capacidad denominado *Four Lane Road*.

### Tipo de accidentes

Para este análisis no se contempla la evaluación de los efectos de la siniestralidad en el tramo por lo que se le asignó un tipo de accidentes denominado (Four Lane Road) precargada en HDM-4 la cual tiene definida una tasa de accidentes igual a 0 accidentes por cada 100 millones de veh-km.

### Zonas climáticas

De acuerdo con el catálogo de climas realizado por el IMT para la red del Fondo Nacional de Infraestructura a la región del Libramiento Noreste de Querétaro, le corresponden las zonas climáticas identificadas como BS1hw(w) y BS1Kw(w) las cuales contienen los siguientes datos:

Tabla 4.3 Características de la zona climática utilizada en HDM-4

Clasificación por humedad	Semiárido	Temperatura media	22°C
Índice de Humedad	-40	Rango promedio de temperaturas	17°
Duración de la estación seca	9 (meses)	Días con T> 32 °C	60 días
Precipitación media mensual	50 mm	Índice de congelamiento	0
Clasificación por temperatura	Subtropical-cálido	Carreteras cubiertas de agua	10 % de tiempo de conducción



## Series y juegos de calibración

Los juegos de calibración almacenan coeficientes de los modelos de deterioro de HDM-4, para una clase de superficie y tipo de pavimento dados.

En una serie de calibración se agrupa juegos de valores para un conjunto de tramos, es decir, para una red o subred.

En el caso de los pavimentos de concreto hidráulico, en estos juegos se definen, además, datos muy relevantes como tipo de material de la subrasante (fino o granular), módulo  $k$  de respuesta de las capas inferiores, módulo de elasticidad del concreto, módulo de ruptura y tipo de base. Debido a lo anterior, aunque no se modifiquen propiamente los coeficientes, HDM-4 obliga a especificar un juego de calibración para cada tramo objeto de análisis.

De esta manera, se creó la serie de calibración *Red FONADIN* y, dentro de ella, se definió el juego Red FONADIN (2,0,0,0,150,1) para un pavimento de concreto hidráulico. Los números entre paréntesis son los códigos empleados por HDM-4 para identificar la clase de superficie, el tipo de pavimento y el material de la capa superficial o el tipo de subrasante según se trate de pavimentos asfálticos o de concreto. En la Tabla 4.4 se muestran los valores para el juego de calibración de concreto hidráulico.

Tabla 4.4 Datos del juego de calibración para concreto hidráulico

Variable	Valor
Tipo de material de la subrasante	Granular
Módulo $k$ de respuesta de las capas inferiores	54 MPa/m
Módulo de elasticidad del concreto	29,000 MPa
Módulo de ruptura	4.50 MPa
Tipo de base	Granular

### 4.3 Datos del análisis

Para efectuar el análisis de las alternativas base, modernización a concreto y asfalto con HDM-4 se requiere información del tipo:

- Flota vehicular (Composición y volumen de vehículos)
- Estructura del pavimento
- Red carretera (Segmentación homogénea)
- Estándares de trabajo
- Parámetros de análisis

#### 4.3.1 Flota vehicular

Para la evaluación económica de este proyecto, se creó la flota vehicular denominada Flota representativa de la red FONADIN, la cual está constituida por los vehículos que considera la Dirección General de Servicios técnicos de la SCT (DGST), de la cual se obtuvieron los aforos anuales para el Libramiento Noreste de Querétaro Mex-057D de la Red Federal de Cuota.



Los datos de los costos unitarios de los insumos que requiere HDM-4, para estimar el consumo de cada recurso (combustible, lubricante, neumáticos, refacciones, etc.) para integrar el costo total de operación vehicular se obtiene de la publicación técnica (PT) no. 337 del IMT (Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano 2010) donde se actualizó el costo del combustible.

Dentro de la flota vehicular se definen también “series de crecimiento del tránsito”, las cuales permiten especificar tasas de crecimiento por tipo de vehículo para períodos anuales. Para este caso se creó una serie denominada crecimiento al 4%, la cual especifica un crecimiento del 4% anual para toda la flota vehicular.

La Tabla 4.5 muestra un listado de los vehículos que integran la flota vehicular utilizada, y un resumen de los costos unitarios de los insumos para cada vehículo.

*Tabla 4.5 Insumos de la flota vehicular*

Concepto	A	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4
<b>Vehículo nuevo</b>	202,050	1'980,082	488,082	561,326	1'059,470	1'101,920	1'293,080
<b>Reemplazo neumático</b>	821.48	2,514.71	2,350.67	2,350.67	2,350.67	2,350.67	2,350.67
<b>Combustible</b>	10 / 1	10.36 / 1	10.36 / 1	10.36 / 1	10.36 / 1	10.36 / 1	10.36 / 1
<b>Lubricante</b>	24.49 / 1	24.06 / 1	24.06 / 1	24.06 / 1	24.06 / 1	24.06 / 1	24.06 / 1
<b>Mano de obra (mantenimiento)</b>	21.15 / h	55.40 / h	36.80 / h				
<b>Salarios operadores</b>	0	65.10 / h	45.76 / h	45.76 / h	52.20 / h	52.20 / h	52.20 / h

### 4.3.2 Segmentación homogénea del tramo

HDM-4 emplea como unidades de análisis *segmentos homogéneos* de carretera, los cuales pueden definirse como tramos en los que los parámetros de diseño geométrico, tipo de pavimento, condición de la capa de rodadura y capacidad estructural, así como las variables climáticas, pueden caracterizarse mediante valores representativos. El sistema agrupa los segmentos homogéneos, en *redes de carreteras*; cada análisis que se efectúa con HDM-4, está vinculado a una sola red de carreteras.

Las redes de carreteras tienen asociada una flota vehicular, de manera que el volumen de tránsito y su composición puedan definirse en términos de los vehículos que forman parte de esta flota.

Para el análisis se utilizó la red de carreteras llamada *Libramiento Noreste de Querétaro*. Esta red se integró con respecto a indicadores de condición a partir de segmentos homogéneos obtenidos con base información diversa recopilada por el IMT como parte de los trabajos previos desarrollados para CAPUFE y en el tránsito aforado por la DGST en 2011, incluyendo la composición, en la que destaca un porcentaje de vehículos pesados del orden de 60%.

En total, se obtuvieron de 14 segmentos homogéneos, 8 para un sentido de circulación o cuerpo A y 6 para el cuerpo B.



*Tabla 4.6 Segmentos homogéneos obtenidos del Sistema de Gestión de Pavimentos (SGP)*

No.	Nombre del segmento	Zona climática	Clase de superficie	Longitud (m)	TDPA (veh.)	IRI (m/km)
A1	S1C2, km. 001+000 al 006+800	BS1hw(w)	Concreto	5.80	6567	4.22
A2	S1C2, km. 006+800 al 008+000	BS1hw(w)	Concreto	1.20	6567	3.42
A3	S1C2, km. 008+000 al 013+310	BS1Kw(w)	Concreto	5.31	6567	3.42
A4	S1C2, km. 013+310 al 020+320	BS1Kw(w)	Concreto	7.009	6567	3.42
A5	S1C2, km. 020+320 al 022+000	BS1Kw(w)	Concreto	1.68	6778	3.42
A6	S1C2, km. 022+000 al 023+000	BS1Kw(w)	Concreto	1.00	6778	3.42
A7	S1C2, km. 023+000 al 027+000	BS1Kw(w)	Concreto	4.00	6778	3.42
A8	S1C2, km. 027+000 al 036+100	BS1Kw(w)	Concreto	9.09	6778	4.19
B1	S1C2, km. 000+806 al 003+000	BS1Kw(w)	Concreto	2.194	6708	4.72
B2	S2C2, km. 003+000 al 013+310	BS1hw(w)	Concreto	10.31	6708	4.72
B3	S2C2, km. 013+310 al 020+320	BS1hw(w)	Concreto	7.009	6708	4.69
B4	S2C2, km. 020+320 al 023+000	BS1Kw(w)	Concreto	2.68	6438	3.98
B5	S2C2, km. 023+000 al 034+000	BS1Kw(w)	Concreto	11.0	6438	3.98
B6	S2C2, km. 034+000 al 037+000	BS1Kw(w)	Concreto	3.00	6438	3.98

Como resultado del proceso de obtención de los segmentos homogéneos y la red de carreteras, se generó un archivo de intercambio de HDM-4 en formato de base de datos de Microsoft Access, el cual puede consultarse en el anexo A. Esta base de datos contiene las 4 tablas que a continuación se describen brevemente:

- a. FILETYPE. Tabla de control usada por HDM-4 para identificar el tipo de información almacenado en la base de datos.
- b. ROADNET. Es una descripción de la red de carreteras, incluyendo las especificaciones de serie de calibración y flota vehicular asociadas a la red.
- c. SECTIONS. Contiene propiamente la definición de los segmentos homogéneos, junto con toda la información de estos. Nótese que se trata de una tabla con un gran número de campos (112 en total), de los cuales sólo se modificaron aquellos relacionados con



la identificación de los segmentos, características geométricas, tránsito, diseño estructural y estado físico (55 campos). Para el resto de los campos se conservaron los valores por omisión de HDM-4.

- d. TRAFFIC. Se especifica aquí la composición del tránsito para cada segmento en número de vehículos.

#### 4.4 Estándares de trabajo

Para el análisis de este proyecto las opciones de rehabilitación de la vía se definieron cuatro estándares de conservación, dos de ellos corresponden a la opción de tratamiento mínimo y contienen únicamente acciones de mantenimiento rutinario para cada opción. Los otros dos implementan los trabajos de conservación periódica necesarios en cada tipo de pavimento para mantener el tramo en condiciones de operación adecuadas. Los estándares anteriores recibieron las denominaciones que se indican en la siguiente tabla.

*Tabla 4.7 Denominaciones de los estándares de conservación definidos para el análisis.*

Estándar	Denominación
<b>Mantenimiento mínimo (asfalto)</b>	EC1A - Mantenimiento de rutina (asfalto)
<b>Conservación periódica (asfalto)</b>	EC2A - Microcarpeta, reposición carpeta, reconstrucción (asfalto)
<b>Mantenimiento mínimo (concreto)</b>	EC1C - Mantenimiento de rutina (concreto)
<b>Conservación periódica (concreto)</b>	EC2C - Reposición del sello, reposición de losas, fresado (concreto)

Como se aprecia en la tabla anterior, las denominaciones de los estándares de conservación periódica son indicativas de las acciones que en ellos se incluyen. En las tablas 4.8 a 4.11 se resumen las principales características de estas acciones. La descripción completa de los estándares puede consultarse también abriendo el espacio de trabajo incluido en el anexo A con HDM-4.

*Tabla 4.8 Estándar EC1A - Mantenimiento de rutina (asfalto).*

Acción	Diseño	Intervención	Costo económico.
<b>MR01 - Calafateo y sellado de grietas</b>	—	Intervalo = 1 año	\$52.00/m <sup>2</sup>
<b>MR02 - Bacheo</b>	—	Intervalo = 1 año	\$147.50/m <sup>2</sup>
<b>MR03 - Limpieza y reparación de drenaje</b>	—	Intervalo = 1 año	\$5,000.00/km
<b>MR04 - Control de vegetación</b>	—	Intervalo = 1 año	\$890.00/km/año



Tabla 4.9 Estándar EC2A - Microcarpeta, reposición carpeta, reconstrucción (asfalto).

Acción	Diseño	Intervención	Costo económico.
<b>MP01 - Microcarpeta para ACA &gt; 15 %</b>	Espesor = 25 mm	ACA $\geq$ 15 % IRI $\leq$ 2.8 Intervalo $\geq$ 3 años	\$46.89/m <sup>2</sup>
<b>MP02 - Reposición de carpeta para IRI &gt; 2.8 m/km</b>	Prof. fresado = 100 mm Espesor = 100 mm	IRI $\geq$ 2.8 PR $\geq$ 6 ACA $\geq$ 25 % Intervalo $\geq$ 7 años	\$212.03/m <sup>2</sup>
<b>MM01 - Reconstrucción para IRI &gt; 5 m/km</b>	Espesor = 100 mm SNP = 7	IRI $\geq$ 5.0 PR $\geq$ 12 ACA $\geq$ 50 %	\$466.50/m <sup>2</sup>
<b>EC1A - Mantenimiento de rutina (asfalto)</b>	—	—	—

Tabla 4.10 Estándar EC1C - Mantenimiento de rutina (concreto).

Acción	Diseño	Intervención	Costo econ.
MRC1 - Sellado de grietas	—	Intervalo = 1 año	\$12,250.00/km/año
MRC2 - Limpieza de obras de drenaje	—	Intervalo = 1 año	\$5,000.00/km/año
MRC3 - Control de la vegetación	—	Intervalo = 1 año	\$890.00/km/año

Tabla 4.11 Estándar EC2C - Reposición del sello, reposición de losas, fresado (concreto).

Acción	Diseño	Intervención	Costo econ.
<b>MPC1 - Reposición del sello en juntas @10 años</b>	—	Intervalo = 1 año	\$20,148/km
<b>MPC2 - Reposición de losas para agriet. &gt; 5 %</b>	—	Agriet. $\geq$ 5 %	\$705.85/km
<b>MPC3 - Fresado para IRI <math>\geq</math> 2.8 m/km</b>	—	IRI $\geq$ 2.8	\$41.67/m <sup>2</sup> /mm
<b>EC1C - Mantenimiento de rutina (concreto)</b>	—	—	—

Para complementar la información contenida en las tablas 4.8 a 4.11 debe tenerse en cuenta lo siguiente:

- a. Los estándares de conservación periódica incluyen las acciones de mantenimiento de rutina, de modo que una alternativa basada en tales estándares también contemple la ejecución de este tipo de mantenimiento.



- b. Las especificaciones de diseño contenidas en los estándares son de carácter general, para efectos de evaluación económica. Evidentemente, tales especificaciones deben llevarse al detalle necesario mediante la elaboración de los correspondientes proyectos ejecutivos.
- c. En todos los casos se eligió la opción de que HDM-4 estime los efectos de las acciones sobre el comportamiento del pavimento.
- d. No se ingresaron datos en el apartado relativo a la valuación de activos para ninguna acción.

#### **4.5 Configurar ejecución del análisis y ejecutar corrida**

Para este ejemplo se hicieron 3 corridas en HDM-4 con las características mencionadas en los puntos anteriores.

La primera corrida consistió en la evaluación de la vía con las condiciones actuales, utilizando el estándar de conservación mínima como alternativa base y mantenimiento periódico como la alternativa de comparación.

La segunda corrida se evaluó un pavimento con las condiciones que asemejaran la alternativa de una sobrecarpeta con pavimento de concreto simple con juntas o JCPC (*siglas en ingles de jointed plain concrete pavement*) sobre un pavimento de concreto hidráulico con sus dos estándares de conservación mínima rutinaria y de mantenimiento periódico.

La tercera corrida se ejecutó con un pavimento de material asfáltico sobre el pavimento de concreto hidráulico con sus dos estándares de conservación mínima rutinaria y de mantenimiento periódico.

En los análisis de proyecto HDM-4, compara las distintas alternativas de intervención definidas con la alternativa base mediante un análisis costo/beneficio. Este análisis se realizó de forma separada extrayendo de las bases de datos generadas por las corridas individuales obteniendo para cada alternativa los indicadores económicos, resultado de los modelos de deterioro para los distintos tipos de pavimento. Este análisis se realizó en tablas programadas de Excel exportando de las bases de datos “Consulta RunData” que es el compilado de las corridas individuales.

#### **4.6 Resultados del análisis del proyecto de modernización del libramiento**

El primer resultado obtenido se presenta en la siguiente tabla donde se puede apreciar que la alternativa de modernización a pavimento de concreto asfáltico no es rentable teniendo valores presentes netos negativos de hasta 10.055 mdp. La alternativa de la construcción de una capa de 35 cm de concreto hidráulico se puede apreciar que desde el punto de vista económico es rentable por el VPN y la TIR.



Tabla 4.12 Análisis costo/beneficio (Concreto, Asfalto) TDPA 6567 veh/día.

Segmento	Longitud	VPN-Concreto	TIR-Concreto	VPN-Asfalto	TIR-Asfalto
<b>S1C2, km</b> <b>001+000 al 006+800</b>	5.800	22.285	18.6	-6.642	7.0
<b>S1C2, km</b> <b>006+800 al 008+000</b>	1.200	4.334	18.0	-1.651	6.3
<b>S1C2, km</b> <b>008+000 al 013+310</b>	5.310	19.191	18.0	-7.293	6.3
<b>S1C2, km</b> <b>013+310 al 020+320</b>	7.010	29.550	19.7	-7.669	6.4
<b>S1C2, km</b> <b>020+320 al 022+000</b>	1.680	9.028	22.0	-1.878	6.0
<b>S1C2, km</b> <b>022+000 al 023+000</b>	1.000	5.371	22.0	-1.121	6.0
<b>S1C2, km</b> <b>023+000 al 027+000</b>	4.000	21.482	22.0	-4.484	6.0
<b>S1C2, km</b> <b>027+000 al 036+100</b>	9.100	53.337	23.8	-5.736	8.1
<b>S2C2, km</b> <b>000+806 al 003+000</b>	2.194	11.991	23.3	-0.682	10.2
<b>S2C2, km</b> <b>003+000 al 013+310</b>	10.310	56.342	23.3	-3.209	10.2
<b>S2C2, km</b> <b>013+310 al 020+320</b>	7.010	37.807	23.1	-3.380	8.9
<b>S2C2, km</b> <b>020+320 al 023+000</b>	2.680	14.319	22.5	-2.450	6.4
<b>S2C2, km</b> <b>023+000 al 034+000</b>	11.000	58.773	22.5	-10.055	6.4
<b>S2C2, km</b> <b>034+000 al 037+000</b>	3.000	16.005	22.5	-2.767	6.4

En la siguiente gráfica se presenta el comportamiento de la irregularidad (IRI m/km) a través de los años de análisis. Otro punto importante es que se puede notar el año de los trabajos realizados para cada una de las alternativas.

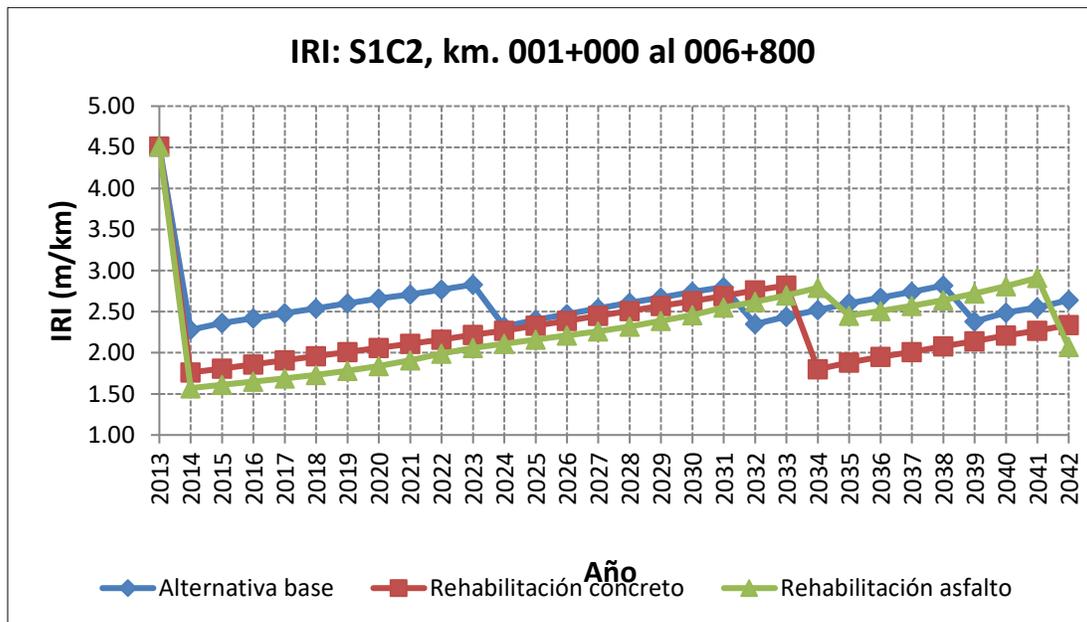


Ilustración 4-3 Gráfica comparativa de la irregularidad para las tres alternativas.

A continuación, la gráfica nos muestra el comportamiento de los costos de operación vehicular, que con el paso de los años se van incrementando, por el deterioro mismo de la vía o por el mismo crecimiento vehicular que se tiene, esto presentado para las 3 alternativas, que a pesar de que no sea muy notoria la diferencia de los COV es significativa porque de estos ahorros depende la realización de la obra.

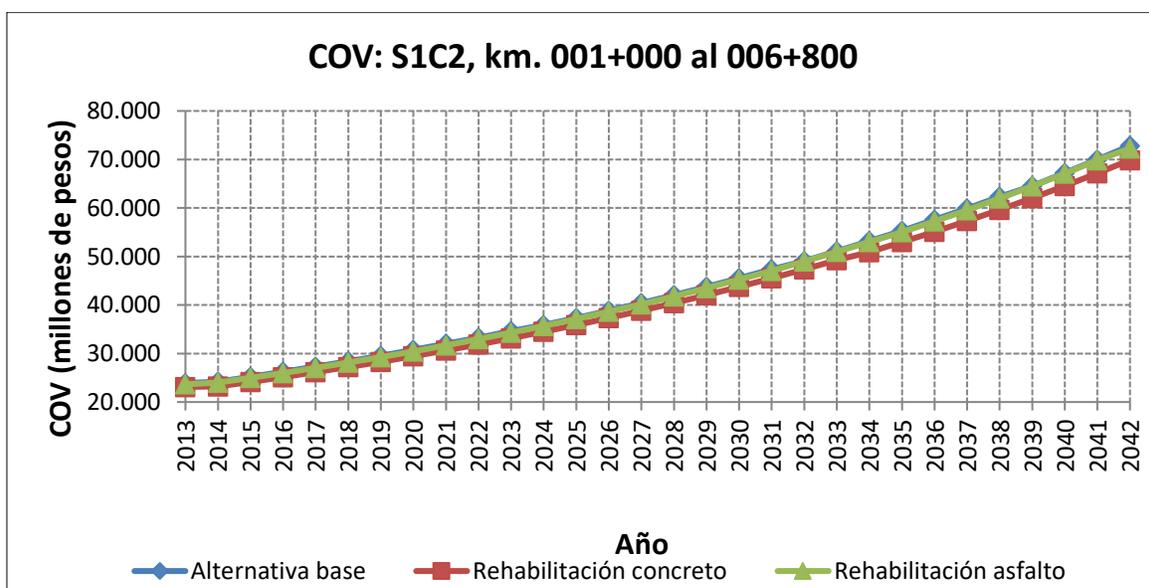


Ilustración 4-4 Gráfica comparativa de los costos de operación vehicular para las tres alternativas.



Habiendo obtenido lo anterior, nos interesamos en saber el punto en el cual el pavimento de concreto asfáltico sería rentable. Para ello se incrementó el tránsito diario promedio anual en un 52% pasando de 6567 veh/día a 9998 veh/día, obteniendo así los siguientes resultados.

Dada la modificación del TDPA para hacer rentable la opción del pavimento asfáltico se percibe que la alternativa de concreto hidráulico sigue siendo más rentable teniendo así VPN de hasta 98.35 mdp comparado con 7.38 mdp para el tramo 003+000 al 13+310 con ahorros mucho más significativos para la alternativa de concreto hidráulico.

*Tabla 4.13 Análisis costo/beneficio (Concreto, Asfalto) TDPA 9998 veh/día.*

Segmento	Longitud	VPN-Concreto	TIR-Concreto	VPN-Asfalto	TIR-Asfalto
<b>S1C2, km. 001+000 al 006+800</b>	5.800	54.897	29.4	3.289	14.8
<b>S1C2, km. 006+800 al 008+000</b>	1.200	10.644	26.8	0.134	12.5
<b>S1C2, km. 008+000 al 013+310</b>	5.310	47.111	26.8	1.179	13.0
<b>S1C2, km. 013+310 al 020+320</b>	7.010	61.304	26.7	0.001	12.0
<b>S1C2, km. 020+320 al 022+000</b>	1.680	15.220	27.2	0.095	12.3
<b>S1C2, km. 022+000 al 023+000</b>	1.000	9.057	27.2	0.055	12.3
<b>S1C2, km. 023+000 al 027+000</b>	4.000	36.229	27.2	0.218	12.3
<b>S1C2, km. 027+000 al 036+100</b>	9.100	85.506	28.7	3.582	14.2
<b>S2C2, km. 000+806 al 003+000</b>	2.194	20.930	29.2	1.491	15.4
<b>S2C2, km. 003+000 al 013+310</b>	10.310	98.351	29.2	7.387	15.7
<b>S2C2, km. 013+310 al 020+320</b>	7.010	39.338	18.3	3.200	14.6
<b>S2C2, km. 020+320 al 023+000</b>	2.680	23.685	27.4	0.615	13.2
<b>S2C2, km. 023+000 al 034+000</b>	11.000	97.218	27.4	1.223	12.6
<b>S2C2, km. 034+000 al 037+000</b>	3.000	26.497	27.4	0.662	13.2

En esta gráfica de la irregularidad (IRI m/km) no se observa alguna variación importante respecto a la obtenida con un TDPA de 6567 veh/día. Se realiza un fresado al pavimento de 3mm en el primer año para la alternativa base, y la construcción de la sobrecarpeta asfáltica o de concreto las alternativas de modernización, la alternativa base continúa realizando trabajos de mantenimiento rutinario, reposiciones de carpeta de acuerdo con las especificaciones propuestas cuando la irregularidad llegue a un valor de IRI=2.8 m/km. La alternativa de asfalto realiza trabajos de reposición de carpeta (Fresado y carpeta de 100mm) cuando la irregularidad llegue a un valor IRI=2.8 m/km. La alternativa de concreto hidráulico realiza la conservación periódica con trabajos de fresado y reposición de losas agrietadas.

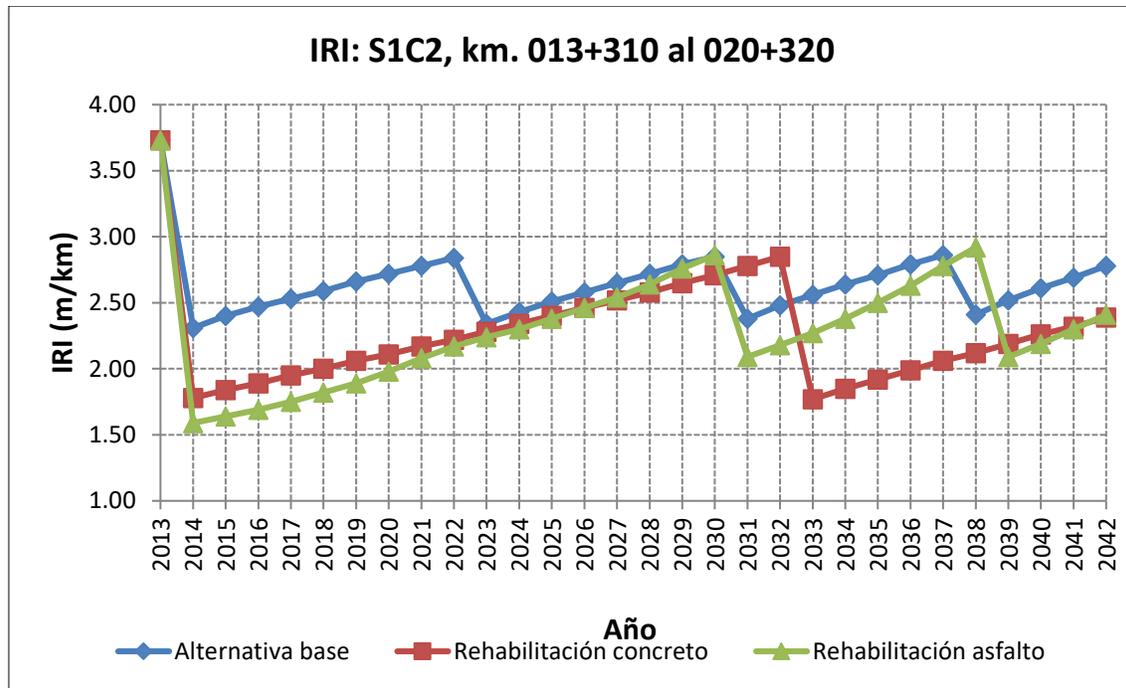


Ilustración 4-5 Gráfica comparativa de la irregularidad (IRI m/km).



La siguiente gráfica representa los COV que en comparación con la presentada anteriormente tenemos aquí un incremento significativo por el mismo incremento del tránsito. Pese a ello, sigue existiendo un ahorro en los costos de operación vehicular cuando se ejecuta la modernización de concreto hidráulico.

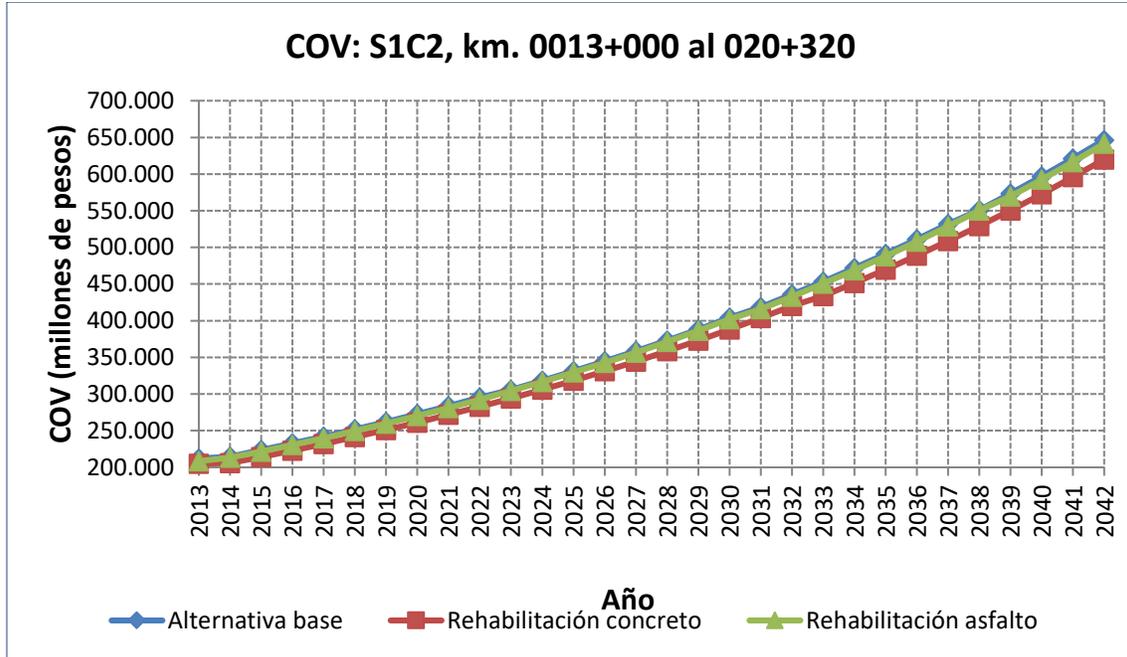


Ilustración 4-6 Gráfica comparativa de los costos de operación vehicular (COV).



#### 4.7 Conclusiones del análisis del ciclo de vida de un proyecto de reconstrucción

La siguiente tabla muestra la comparación de las alternativas propuestas para este proyecto, de la cual se puede concluir que la alternativa desde el punto de vista técnico y económico es la construcción de una carpeta de concreto hidráulico sobre el pavimento existente, la cual aporta mayores beneficios a los usuarios.

*Tabla 4.14 Análisis técnico-económico para las tres alternativas implementadas*

Resultados	Conservación rutinaria	Carpeta Asfalto	Carpeta Concreto
<b>Reducción en los COV</b>	0.00	798.37 mdp	4817.4 mdp
<b>VPN</b>	0.00	23.1 mdp	652.52 mdp
<b>TIR promedio</b>	0	13.4	27.8
<b>IRI promedio</b>	2.66 m/km	2.32 m/km	2.30 m/km
<b>Número de intervenciones</b>	3	2	1

El resultado para este análisis técnico económico con ayuda de HDM-4 se resume a que la opción de la construcción de la carpeta de concreto hidráulico es rentable dado a la reducción de los costos de operación vehicular (COV) acumulado de los tramos y todos los años de análisis, teniendo además un valor presente neto (VPN) de 652.52 mdp con una tasa interna de retorno (TIR) de 27.8, logrando así con una intervención mayor (Fresado) y un mantenimiento periódico y rutinario una irregularidad promedio de 2.3 m/km.





## Capítulo 5 Estudio de caso: Evaluación de un proyecto de mejora con alternativas de ampliación parcial o adición de dos carriles

### 5.1 Introducción

La aplicación del HDM-4 a la evaluación de proyectos de mejora, se puede ejemplificar en este estudio de caso, el cual consiste en la evaluación de un tramo carretero de características homogéneas con problemas de congestión y de relación alta de volumen/capacidad.

La evaluación de este tipo de proyectos se origina a raíz del crecimiento poblacional, que incrementa los volúmenes de tránsito vehicular, el cual afecta a los usuarios de estas vías incrementando el tiempo de recorrido. El tránsito diario promedio anual es de alrededor de 15,913 vehículos/día provocando que la funcionalidad del camino sea insuficiente.

Al mismo tiempo, debido a las cargas transmitidas por los automóviles se generan daños a la superficie de rodadura incrementando los costos de operación vehicular, lo que se convierte en un problema, ya que el camino existente no satisface las necesidades de los usuarios.

Este estudio de caso presenta el análisis económico de la ampliación de una carretera pavimentada, cuyo propósito es evaluar los beneficios económicos de la inversión propuesta para el estándar de mejora.

La viabilidad económica del proyecto se evalúa mediante la comparación de la alternativa de proyecto base (conservación con recuperación del pavimento y carpeta de la carretera con pavimento de mezcla asfáltica compactada en caliente), las opciones de mejoras a evaluar. (Ampliaciones parciales de uno y tres metros y adición de dos carriles). Y proponer las acciones de mejora para conservar el nivel de servicio requerido por la Secretaría de Comunicaciones y Transporte buscando así que los costos de operación vehicular (COV) se mantengan en niveles bajos y no tiendan a elevarse.

### 5.2 Descripción y detalles del proyecto

El tramo homogéneo representativo es una carretera primaria de dos carriles con circulación en ambos sentidos, una longitud de 10 km con un ancho de calzada de 7 m y acotamientos de 1m, construida con una superficie de rodadura de mezcla asfáltica sobre base granular.

En las tablas que se muestran a continuación se pueden ver algunos parámetros que involucran la descripción del tramo carretero a evaluar.





*Tabla 5.1 Geometría del tramo (Proyecto ampliación)*

Ascensos y descensos	15 m/km	Ruido de aceleración debido al conductor y al alineamiento de la carretera	0.1 m/s <sup>2</sup>
No. De ascensos y descensos	2 no. /km	Límite de velocidad	100 km/h
Sobreelevación	2.5 %	Cumplimiento del límite de velocidad	1.1
Curvatura horizontal promedio	50 deg/km	Altitud	0.0 m

*Tabla 5.2 Condición del pavimento existente*

Variable	Condición al final del año 2011
Tipo de pavimento	Mezcla asfáltica sobre base granular
Espesor de la capa superficial reciente	70 mm
Espesor anterior	70 mm
Año de la última reconstrucción	2004
Capacidad estructural	SNP=4
Irregularidad (IRI)	3.5 (IRI – m/km)
Agrietamiento estructural. Total	5 (%)
Area con desprendimientos	10 (%)
Número de baches	5 (No. /km)
Prof. Media de roderas	7 (mm)
Profundidad de la textura	0.5 (mm)
Resistencia al deslizamiento	0.4 (SCRIM 50 km/h)



### 5.3 Configuración de HDM-4

Antes de comenzar a insertar datos para el análisis del proyecto, es necesario definir algunos parámetros de calibración que se enlistan a continuación donde se indica la subcategoría de información en la que se definen estos datos dentro de HDM-4.

- Régimen horario del tránsito a lo largo del año (modelos de tránsito).
- Capacidad de los tramos para acomodar el flujo vehicular (tipo de velocidad/capacidad)
- Siniestralidad (tipos de accidentes)
- Zonas climáticas por las que discurre la carretera (zonas climáticas)
- Calibración de los modelos de deterioro de HDM-4 (series y juegos de calibración)

*Tabla 5.3 Configuraciones dentro de HDM-4 (Proyecto ampliación).*

<b>Modelo de Tránsito:</b>	Para este proyecto no se cuentan con datos para determinar un modelo por lo que se opta por un modelo (commuter) suburbano
<b>Tipo de velocidad/capacidad:</b>	Datos por omisión para una carretera de dos carriles (Two Lane Road)
<b>Tipo de Accidentes:</b>	No se contempla la evaluación de los efectos de siniestralidad y se define una tasa igual a 0 accidentes por cada 100 millones de veh-km
<b>Zona Climática:</b>	Corresponde a la zona Subtropical cálido – semiárido
<b>Juego de calibración</b>	Serie de calibración <i>Red Federal</i> , definiendo así el juego de calibración <i>Carpeta asfáltica</i> para un pavimento de concreto asfáltico

### 5.4 Datos del análisis

Además de los datos antes descritos, para efectuar el análisis técnico-económico de las alternativas propuestas HDM-4 requiere información adicional diversa agrupada en las siguientes categorías.

- Flota vehicular
- Red carretera
- Estándares de trabajo (conservación y mejora)

#### **Flota vehicular:**

A fin de poder estimar los costos de operación vehicular generados al circular por una carretera es necesaria la definición de una flota vehicular.

Para este proyecto se creó una flota denominada *Flota Representativa del Tramo* constituida por los vehículos que considera la Dirección General de Servicios Técnicos de la SCT (DGST).



En términos generales, en una flota vehicular se definen las características físicas y mecánicas de cada vehículo, los costos unitarios de los insumos que se requieren para la operación de este integrando así el costo total de operación vehicular.

Dentro de la flota vehicular se definen también *series de crecimiento del tránsito*, las cuales permiten especificar tasas de crecimiento por tipo de vehículo para períodos anuales o plurianuales. En el caso del análisis que aquí se presenta, se creó una serie denominada *crecimiento al 5%* la cual especifica un crecimiento a esa tasa para todos los vehículos de la flota durante todo el periodo de análisis de 20 años.

En la Tabla 5.4 se presenta un listado de los vehículos que integran la flota vehicular utilizada. La Tabla 5.5 muestra un resumen de los costos unitarios de los insumos para cada vehículo.

*Tabla.5.4 Flota vehicular empleada en el estudio (Proyecto ampliación).*

Vehículo	Tipo base HDM-4	Descripción
A	Automóvil mediano	Nissan Sentra modelo 2008
B3	Autobús interurbano	Scania K 380 modelo 2010
C2	Camión mediano	International Navistar 4300 modelo 2010 de 2 ejes
C3	Camión pesado	International Navistar 4300 modelo 2010 de 3 ejes
T3-S2	Camión articulado	International 9200i modelo 2010 con semirremolque de 2 ejes
T3-S3	Camión articulado	International 9200i modelo 2010 con semirremolque de 3 ejes
T3-S2-R4	Camión articulado	International 9200i modelo 2010 con remolque de 2 ejes y semirremolque de 4

*Tabla 5.5 Resumen de costos unitarios de insumos de los vehículos.*

Concepto	A	B	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4
Vehículo nuevo	202,050	1'980,082	488,082	561,326	1'059,470	1'101,920	1'293,080
Reemplazo neumático	821.48	2,514.71	2,350.67	2,350.67	2,350.67	2,350.67	2,350.67
Combustible	10.36 / l	10.72 / l					
Lubricante	54.49 / l	50.16 / l					
Mano de obra mant.	21.15 / h	55.40 / h	36.80 / h				
Salarios operadores	0	65.10 / h	45.76 / h	45.76 / h	52.20 / h	52.20 / h	52.20 / h



## Red Carretera

Para este proyecto se contempla un tramo homogéneo cuyos parámetros de diseño geométrico, tipo de pavimento, condición de la capa de rodadura y capacidad estructural, así como las variables climáticas, se caracterizaron mediante valores representativos.

Las redes de carreteras tienen asociada una flota vehicular, esta a su vez está comprendida por su composición y el volumen de tránsito para formar un conjunto a la hora de la evaluación técnico-económica.

*Tabla 5.6 Tramo utilizada en HDM-4 para la evaluación de las ampliaciones*

Tramo	Tipo de carretera	Clase de superficie	TDPA (veh/día)	Long.	Ancho de calzada	IRI (m/km)
Tramo Homogéneo 0+000 al 10+000	Básica	Asfáltica	15,913	10 km	7.0 m	3.5

### 5.5 Descripción y detalles del análisis.

Un aspecto fundamental del análisis de las opciones propuestas se refiere a los trabajos de conservación, que deben preverse para mantener el tramo durante el período de análisis en una condición acorde con los requerimientos de la Secretaría.

A este respecto, HDM-4 contempla la especificación de *estándares de trabajo* que definen formas de acometer la conservación o mejora de tramos carreteros, durante un período definido por el usuario. Estos estándares se utilizan más adelante en la integración de alternativas para el tratamiento de los tramos, las cuales se evalúan con respecto a una alternativa de tratamiento mínimo o *alternativa base* a fin de determinar la más conveniente en términos de análisis costo/beneficio. Normalmente, en un análisis de HDM-4 se definen varias alternativas adicionales a la alternativa base con el objeto de proveer a los tomadores de decisiones con un abanico de opciones respecto al curso de acción por seguir.

En términos generales, un estándar de trabajo no es más que un conjunto de acciones de conservación o mejora específicas destinadas a la atención de un tramo durante su vida de diseño. La definición de cada una de estas acciones incluye el ingreso de la siguiente información cuando se trata de un estándar de conservación. Los parámetros de construcción, pavimento y geometría solo se definen al crear un estándar de mejora.

- *Información general.* Se trata básicamente de identificadores de la alternativa, del tipo de acción y del elemento de la carretera sobre el que se aplica.
- *Datos de diseño.* Comprende aspectos como espesor, material y resistencia de nuevas capas por colocar, profundidad de fresado e indicadores de la calidad de construcción.
- *Intervención.* Define umbrales de actuación de los criterios de intervención en términos de indicadores de la condición, que se busca establecer en el pavimento como IRI o deterioros superficiales o bien intervalos de tiempo o años específicos de intervención. El usuario puede especificar restricciones como intervalos mínimos, para la ejecución de acciones del mismo tipo.
- *Costos.* Incluye dos tipos de costos unitarios: *económicos* y *financieros*. Estos últimos, se refieren al precio unitario de mercado de la acción, mientras que los costos económicos



resultan de deducir de los costos financieros impuestos, subsidios y cualquier otra distorsión.

- *Efectos*. Especifica si los efectos de la acción serán estimados por HDM-4 haciendo uso de sus modelos de deterioro internos, o si serán determinados a partir de parámetros especificados por el usuario.
- *Valuación de activos*. Se refiere al cambio en el valor patrimonial de los activos carreteros como resultado de la ejecución de la acción.
- *Construcción*. Aquí se establecen indicadores de la calidad de la construcción de la capa asfáltica y de la base.
- *Pavimento*. Se detallan características generales de un pavimento, tipo de material superficial, número estructural del pavimento, espesor de la capa superficial y su compactación relativa.
- *Geometría*. Se fijan parámetros relacionados con la geometría que sea característica del tramo

Para el análisis de este proyecto se definió un estándar de conservación que contiene acciones de mantenimiento periódico, necesarios para mantener el tramo en condiciones de operación adecuadas, también se definieron 3 estándares de mejora, los cuales intervendrán en la evaluación para determinar su factibilidad técnico-económica. A continuación, se presentan los detalles de estos estándares en las siguientes tablas.

*Tabla 5.7 Denominaciones de los estándares de conservación y mejora.*

Estándar	Denominación
Conservación con Recuperación y Carpeta	CReCa7 - Mantenimiento de rutina + Recuperación y Carpeta
Ampliación parcial de 1m	Amp-1 – Ensanchamiento parcial de 1m
Ampliación parcial de 3m	Amp-3 – Ensanchamiento parcial de 3m
Adición de dos carriles	Adi-2 – Adición de dos carriles

En las tablas 5.8 a 5.11 se resumen las principales características de los estándares de conservación y mejora con sus acciones.

*Tabla 5.8 Estándar (Conservación) CReCa7 Conservación +Recuperación y Carpeta.*

Acción	Diseño	Intervención	Costo econ.
ReCa7 – Recuperación y Carpeta	70mm	Irregularidad $\geq 3.5$ IRI	\$152.48/m <sup>2</sup>
RiSe12 – Riego de Sello	12mm	Resistencia al deslizamiento $\leq 0.4$ SFC	\$38.61/m <sup>2</sup>
Drenaj – Drenaje Calzada	—	Intervalo $\geq 1$ año	\$00.00/km
Bacheo – Reparación de Baches	—	Intervalo $\geq 1$ año	\$307.90/m <sup>2</sup>
CaSeGr – Calafateo y Sellado de Grietas	—	Agrietamiento estructural ancho $\geq 1\%$	\$36.65/m <sup>2</sup>
Divers – Diversos	—	Intervalo $\geq 1$ año	\$27,500/km-año



Tabla 5.9 Estándar (Mejora) Amp-1 Ensanchamiento parcial de 1 metro.

Acción	Diseño	Intervención	Costo econ.
Amp-1 – Ensanchamiento parcial de 1 m	Incremento en ancho de 1m	Año >=2012, <=2012	\$463,000/km

Tabla 5.10 Estándar (Mejora) Amp-3 Ensanchamiento parcial de 3 metros.

Acción	Diseño	Intervención	Costo econ.
Amp-3 – Ensanchamiento parcial de 3 m	Incremento en ancho de 3m	Año >=2012, <=2012	\$1'389,000/km

Tabla 5.11 Estándar (Mejora) Adic2c Adición de dos carriles.

Acción	Diseño	Intervención	Costo econ.
Adic2c – Ampliación de dos carriles	Adición de dos carriles	Año >=2012, <=2012	\$3'241,000/km

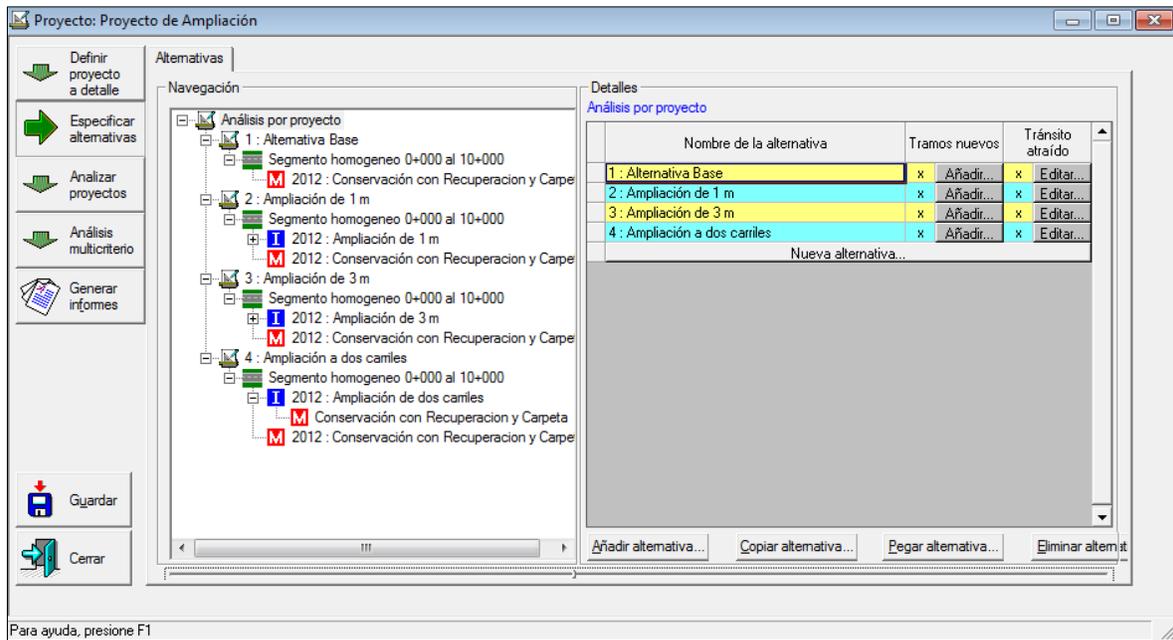


Ilustración 5-1 Visualización de los estándares aplicados a los tramos en HDM-4.

Para complementar la información contenida en las tablas 5.8 a 5.11 debe tenerse en cuenta lo siguiente:

- Los estándares de conservación periódica incluyen las acciones de mantenimiento de rutina, de modo que una alternativa basada en tales estándares también contemple la ejecución de este tipo de mantenimiento.
- Las especificaciones de diseño contenidas en los estándares son de carácter general, para efectos de evaluación económica. Evidentemente, tales especificaciones deben

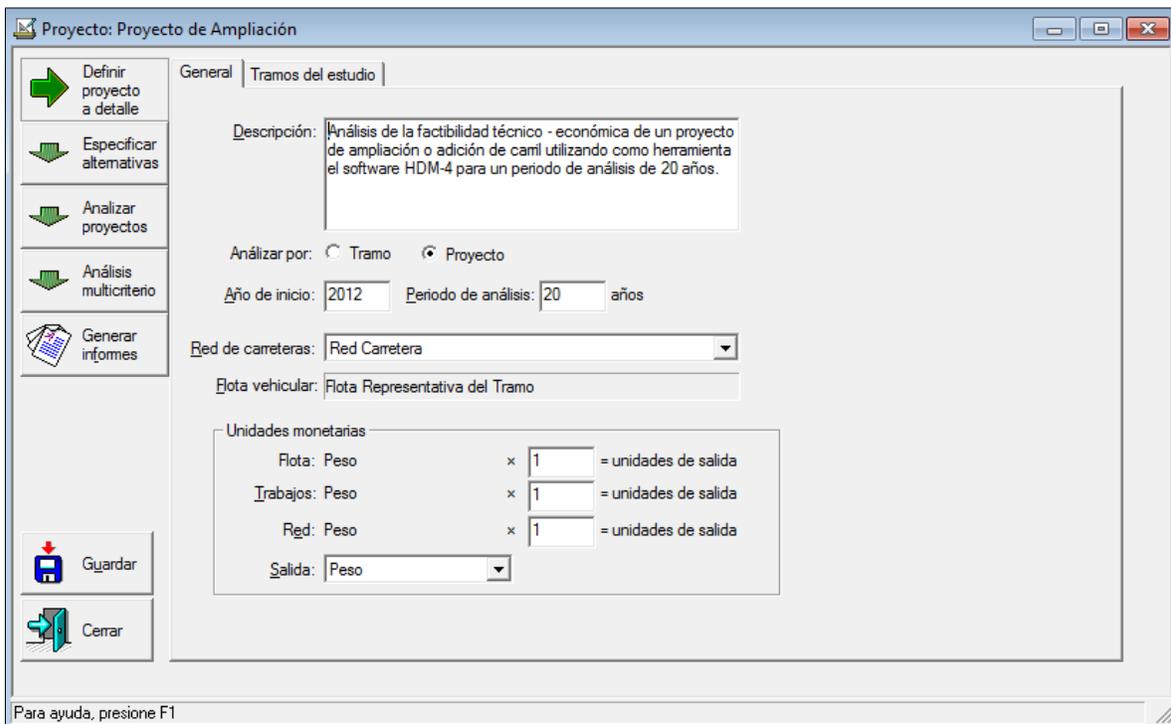


llevarse al detalle necesario mediante la elaboración de los correspondientes proyectos ejecutivos.

- c) En todos los casos se eligió la opción de que HDM-4, estime los efectos de las acciones sobre el comportamiento del pavimento.
- d) No se ingresaron datos en el apartado relativo a la valuación de activos para ninguna acción.

## 5.6 Procedimiento de evaluación y ejecución de la corrida

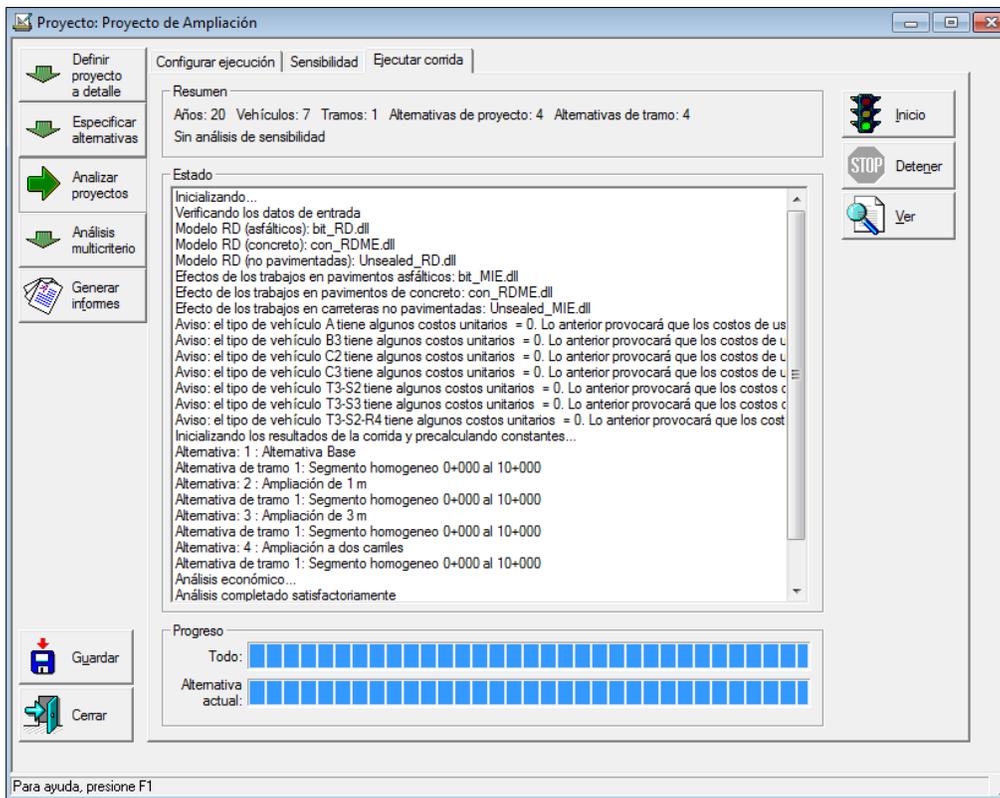
La información que aparece en la pantalla general incluye la descripción del estudio, el tipo de análisis, el período de análisis, la red de carretera, flota vehicular y la moneda que se utiliza para el análisis de estrategias.



*Ilustración 5-2 Ventana de HDM-4 para la definición de los detalles del programa.*

Este análisis se ejecuta por proyecto en donde los tramos se asignan a las alternativas y los estándares a los tramos. El período de análisis inicia en el 2012 con una duración de 20 años (2012-2031), utilizando el peso como la unidad monetaria.

En este análisis se activa la opción de efectuar el análisis económico definiendo así la alternativa base y una tasa de actualización del 12%, no se incluye costos de accidentes ni la inclusión de modelos (Balance energético, emisiones y efectos de aceleración) así también se excluye la sensibilidad del análisis por la falta de datos para este tipo de análisis. El análisis por proyecto de la alternativa base (Conservación con recuperación y carpeta), comparado con las alternativas de modernización (ampliación de 1m, ampliación de 3 m y ampliación de 2 carriles) para obtener así los resultados de la corrida.



*Ilustración 5-3 Inicio del análisis (Proyecto de ampliación).*

En los análisis de proyecto HDM-4 compara las distintas alternativas de intervención definidas con la alternativa base, mediante un análisis costo/beneficio. Del lado de los costos se incluyen todos los gastos generados por la ejecución de acciones de conservación en función de los umbrales de intervención que se especifican en los estándares de trabajo. Los beneficios consisten básicamente en ahorros en costos de operación vehicular derivados del mejoramiento de la condición de los segmentos por efecto de las acciones de conservación realizadas o en su caso la construcción de un libramiento. Se dice que una alternativa de intervención es rentable cuando los beneficios acumulados durante el período de análisis superan a los costos, lo cual se determina mediante indicadores de rentabilidad como el valor presente neto (VPN) o la tasa interna de retorno (TIR).

En el presente estudio, el análisis con HDM-4 tuvo el propósito de evaluar la rentabilidad de varias alternativas de modernización a través de la ampliación parcial o la adición de carriles al tramo evaluado, los resultados obtenidos para la opción en términos de costos, beneficios, indicadores de rentabilidad, desempeño del pavimento y capacidad de la vía se observan en los informes generados por HDM-4.



## 5.7 Resultados de la evaluación económica

Después de ejecutar el análisis, ahora es posible generar informes y realizar un control similar para asegurar las entradas de datos y que el modelado sea el esperado. Posteriormente estos deben ser examinados y verificados

La presentación de los resultados obtenidos se basa en tres de los informes más relevantes de HDM-4.

*Gráfico de irregularidad promedio por tramo.* Presenta la evolución del índice de regularidad internacional (IRI) para cada una de las alternativas definidas. En la figura 5.4 puede apreciarse la evolución de este indicador en el tiempo, incluyendo la recuperación de este por efecto de las acciones de conservación periódica aplicadas. HDM-4 genera uno de estos gráficos por cada tramo que se incluye en el análisis.

*Resumen de trabajos por tramo.* Es un listado de todos los trabajos programados por HDM-4, incluyendo acciones de mantenimiento rutinario, conservación periódica y mejora. Se encuentra organizado por tramos y por alternativa.

*Resumen de indicadores económicos.* Concentra los costos totales en los que incurre la administración de carreteras por la ejecución de las acciones de conservación, los ahorros en costos de usuario producidos por estas mismas acciones y los indicadores de rentabilidad de las alternativas.

Para que un proyecto se realice, es necesario que se cumplan dos condiciones del tipo económico y del tipo técnico, por ello el nombre de la evaluación técnico-económica.

Los dos primeros informes dan cuenta del desempeño de las alternativas desde el punto de vista técnico, mientras que el tercero es una síntesis del resultado de la evaluación económica realizada a través del análisis de proyectos.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la corrida del HDM-4 para las alternativas propuestas consideradas en el análisis. Al final de la sección se hace una interpretación de los resultados obtenidos.

En la figura 5.4 se muestra la gráfica de la irregularidad promedio para el tramo homogéneo con las alternativas definidas con anterioridad.

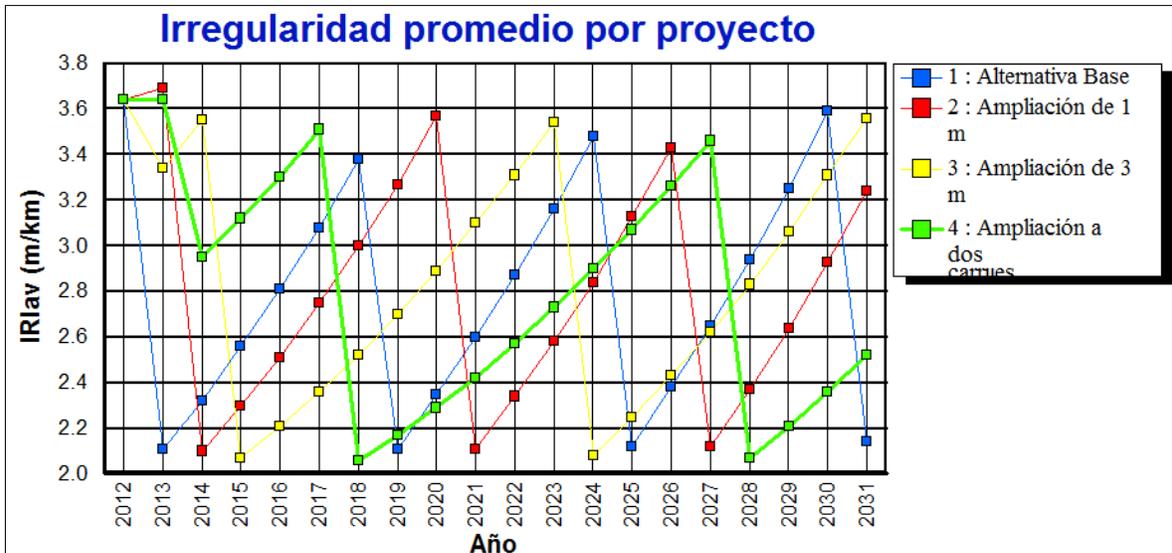


Ilustración 5-4 Gráfica de la irregularidad promedio en (m/km) para el proyecto.

El gráfico de IRI promedio por proyecto ilustración 5.4 se observa lo siguiente:

- El comportamiento de la irregularidad para cada una de las alternativas de evaluación.
- Se observa la evolución acelerada de la irregularidad (IRI) cuando solo se ejecutan obras de conservación rutinaria para la alternativa base.
- La implementación de la mejora (construcción de 2 carriles) permite el retardo del crecimiento del IRI, una evaluación menor debido a la distribución de la carga vehicular.
- Comparando la alternativa base con la implementación de los dos carriles se percibe que se ejecutan 4 acciones de recuperación del pavimento cuando se sigue conservando, y la disminución a solo dos acciones de recuperación cuando se tienen dos carriles adicionales.
- Al revisar el resumen de los trabajos puede comprobarse que las acciones de conservación que se realizan fueron los trabajos diversos que se ejecutan cada año, calafateo y sellado de grietas, recuperación y carpeta de 7 cm.
- De la irregularidad promedio por proyecto tenemos que para la alternativa base (conservación) se tiene un IRI promedio de 2.72 m/km, mientras que con la alternativa de mejora (adicción de carriles) se tiene un IRI promedio de 2.46 m/km, esta diferencia se puede traducir en costos de conservación.



Tabla 5.12 Resumen de trabajos alternativa base.

<b>Tramo:</b> Segmento homogéneo 0+000 al 10+000 <b>Alternativa:</b> 1 : Alternativa Base <b>Sensibilidad:</b> No se realizó análisis de sensibilidad <b>Clase de pavimento:</b> Asfáltica <b>Tipo de carretera:</b> Básica <b>Ancho:</b> 7.00m					
Año	Descripción	Código	Costo económico	Costo financiero	Cantidad
2012	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
	Recuperación y Carpeta de 7 cm	Rec70	10,673,600.0	12,381,600.0	70,000.00 sq. m
2013	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
2014	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
2015	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
2016	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
2017	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
2018	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
	Recuperación y Carpeta de 7 cm	Rec70	10,673,600.0	12,381,600.0	70,000.00 sq. m
2019	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
2020	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
2021	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
2022	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
2023	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
2024	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
	Recuperación y Carpeta de 7 cm	Rec70	10,673,600.0	12,381,600.0	70,000.00 sq. m
2025	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
2026	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
2027	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
2028	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
2029	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
2030	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
	Recuperación y Carpeta de 7 cm	Rec70	10,673,600.0	12,381,600.0	70,000.00 sq. m
2031	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
<b>Costo total del tramo:</b>			<b>48,194,400.0</b>	<b>55,906,400.0</b>	



Tabla 5.13 Resumen de trabajos alternativa ampliación a dos carriles.

<b>Tramo:</b> Segmento homogéneo 0+000 al 10+000 <b>Alternativa:</b> 4 : Ampliación a dos carriles <b>Sensibilidad:</b> No se realizó análisis de sensibilidad <b>Clase de pavimento:</b> Asfáltica <b>Tipo de carretera:</b> Básica <b>Ancho:</b> 7.00m					
Año	Descripción	Código	Costo económico	Costo financiero	Cantidad
2012	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
	Ampliación de dos carriles	Adic2c	15,205,000.0	17,637,500.0	70,000.00 sq. m
2013	Prep. reparación de borde		0.0	0.0	664.04 sq. m
	Prep. reparación		2,028,674.8	2,353,262.8	13,753.73 sq. m
	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
	Ampliación de dos carriles	Adic2c	15,205,000.0	17,637,500.0	70,000.00 sq. m
2014	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
2015	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
2016	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
2017	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
	Recuperacion y Carpeta de 7 cm	Rec70	21,347,200.0	24,763,200.0	140,000.00 sq. m
2018	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
2019	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
2020	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
2021	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
2022	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
2023	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
2024	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	163,888.4	184,905.4	4,471.71 sq. m
2025	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	163,888.4	184,905.4	4,471.71 sq. m
2026	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	163,888.4	184,905.4	4,471.71 sq. m
2027	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
	Recuperacion y Carpeta de 7 cm	Rec70	21,347,200.0	24,763,200.0	140,000.00 sq. m
2028	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
2029	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
2030	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
2031	Diversos	Divers	275,000.0	319,000.0	10.00 km
<b>Costo total del tramo:</b>			<b>81,124,739.8</b>	<b>94,089,379.0</b>	

En cuanto a la velocidad promedio de operación de los vehículos se presentan las siguientes gráficas donde se analiza el comportamiento de las velocidades para las alternativas evaluadas, dando como resultado un decremento considerable en los primeros 8 años para la red cuando solo se realiza la alternativa base (Conservación normal), a diferencia de la alternativa (Ampliación a dos carriles por sentido) que logra incrementar la velocidad de 75 km/h hasta 105 km/h para vehículos tipo A. Ver figura 5.6.

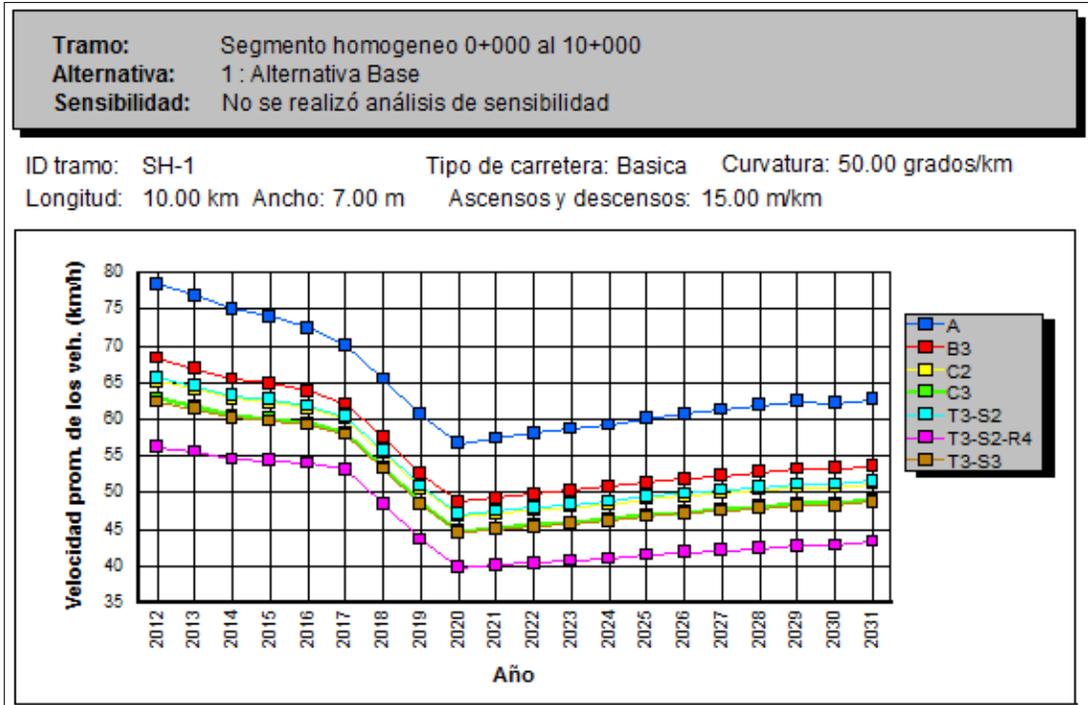


Ilustración 5-5 Gráfica de la velocidad promedio de los vehículos en (km/h) (Alternativa base).

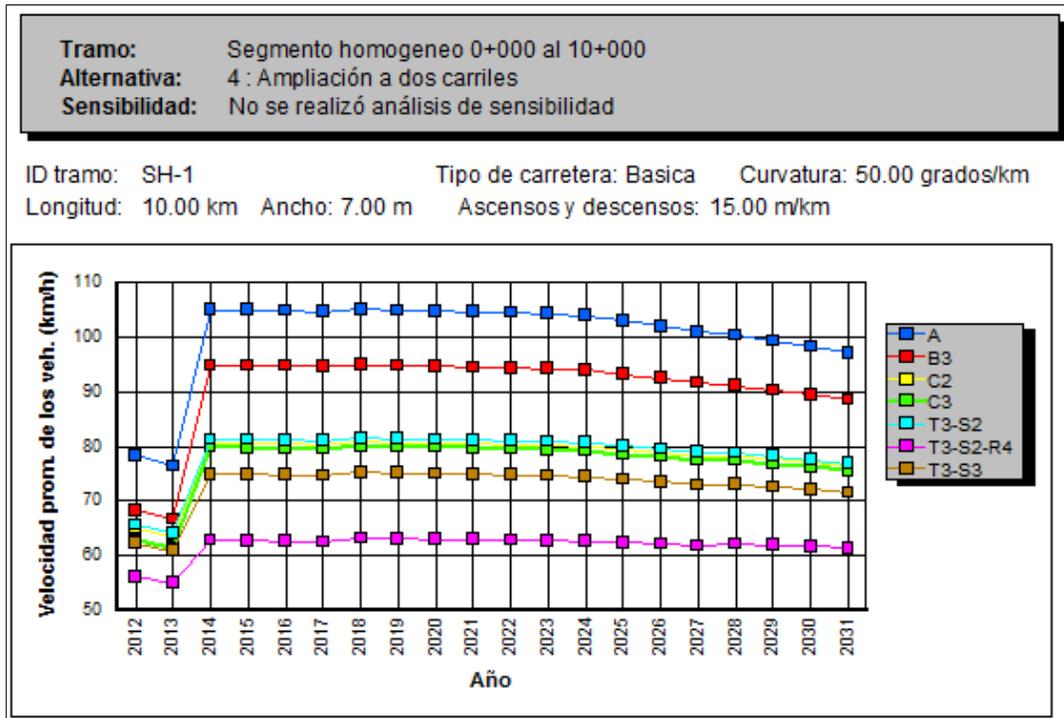


Ilustración 5-6 Gráfica de la velocidad promedio de los vehículos en (km/h) (Ampliación a dos carriles).

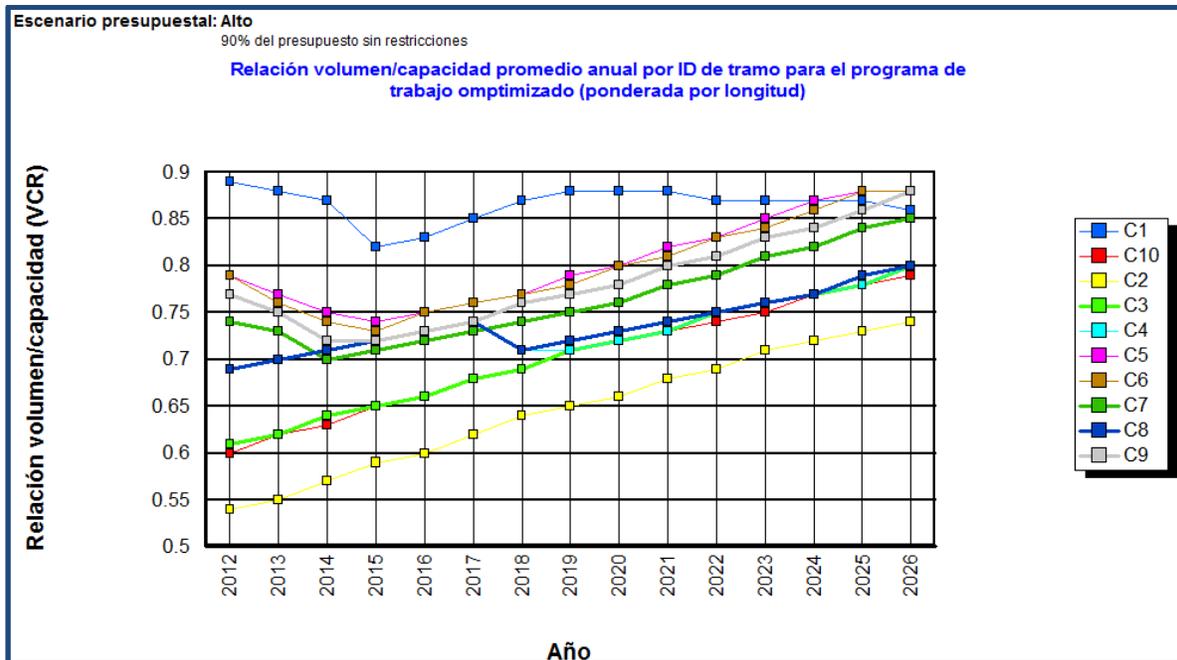


Ilustración 5.7 Gráfica de la relación entre el volumen/capacidad promedio para el tramo homogéneo.

Por lo que respecta a la evaluación económica, en la Tabla 5.14 se muestra el resumen de indicadores económicos para esta opción.

Tabla 5.14 Resumen de indicadores económicos para la alternativa base y libramiento.

Alternativa	Valor presente de los costos totales de la agencia (RAC)	Valor presente de los costos de inversión de la agencia (CAP)	Incremento en costos de la agencia (C)	Decremento en costos de usuario (B)	Beneficios exógenos netos (E)	Valor presente neto (VPN = B+E-C)	Relación VPN/costo (VPN/RAC)	Relación VPN/costo (VPN/CAP)	Tasa interna de retorno (TIR)
1 : Alternativa Base	22.509	20.209	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2 : Ampliación de 1 m	27.273	22.944	4.764	-9.613	0.000	-14.377	-0.527	-0.627	-3.4 (3)
3 : Ampliación de 3 m	38.617	32.199	14.107	147.749	0.000	133.642	3.650	4.150	56.8 (2)
4 : Ampliación a dos carriles	49.019	44.794	26.509	218.017	0.000	191.508	3.907	4.275	36.0 (1)

Por lo que respecta a la evaluación económica se muestra en la Tabla 5.14 el resumen de indicadores económicos, donde la alternativa de la ampliación a dos carriles resulta rentable con un valor presente neto (VPN) mayor a los 191 millones de pesos, relación VPN/costo de 3.904 y tasa interna de retorno (TIR) de 36.0 %.

El valor presente neto (VPN) es el método más conocido a la hora de evaluar proyectos de inversión a largo plazo. El valor presente neto permite determinar si una inversión cumple con el objetivo básico financiero; en el análisis se obtuvo un VPN= 191.382 millones de pesos que indica que este proyecto es rentable.



## 5.8 Conclusiones de la evaluación de un proyecto de mejora con alternativas de ampliación parcial o adición de dos carriles

- ✓ Como primer punto tenemos la irregularidad promedio para las alternativas propuestas, donde se observa el comportamiento de la irregularidad al paso del tiempo para las alternativas. En primera instancia se observa como la ampliación a dos carriles hace que la irregularidad tenga una evolución más lenta en comparación con las demás alternativas y que desde el punto de vista técnico es la mejor opción para la realización de la ampliación.
- ✓ Se obtiene una lista de los trabajos que se deben realizar en el tramo para todos los años de análisis, una sumatoria de los costos económicos y financieros totales del tramo donde suman un total de \$48'194,400.00, cuando se tiene la alternativa base y \$81'124,739.80 en la adición de dos carriles.
- ✓ Otro punto considerado en el análisis es la velocidad de operación de los vehículos donde se muestran los gráficos en la ilustración 5.5 para la alternativa base en observa una reducción promedio de 25 Km/h para todos los vehículos en el transcurso de 8 años. Esto debido al crecimiento del tránsito generando un incremento en los costos de operación vehicular. La alternativa de la adición de dos carriles permite que las velocidades se incrementen a partir del año 2014 incrementando la velocidad en 35 km/h para los vehículos A y B mientras que para el resto solo un incremento de 20 km/h. Aumentando la velocidad de operación vehicular, disminuye el tiempo de recorrido donde todo esto se convierte en la disminución de los costos de operación vehicular (COV). Desde el punto de vista económico es rentable por los decrementos en costos de usuario mostrados en la Tabla de indicadores económicos.
- ✓ Cuando se implementan alternativas de ampliación, generalmente es a causa de problemas con la capacidad de la vía, esto se percibe claramente en la gráfica 5.7 donde el valor de la relación vol. /cap. tiende a valor de uno que significa llegar hasta su capacidad máxima de operación, al implementar la adición de carriles obtenemos una disminución considerable con respecto a la relación vol. /cap. Proporcionando al usuario mayor seguridad y comodidad.
- ✓ De los indicadores económicos y otros aspectos técnicos mostrados en la siguiente tabla se obtiene que de los 6 puntos en comparación la alternativa del libramiento es la más rentable.



*Tabla 5.15 Comparación de resultados (Proyecto ampliación)*

Variable	Alternativa Base	Adición de carriles
Reducción en los costos de usuario	\$0.00 mdp	\$ 217.89 mdp
Valor presente neto	\$ 0.00 mdp	\$ 191.38 mdp
Relación VPN/Costo	0.00	4.27
Tasa interna de retorno	0.00	36.0
IRI promedio por proyecto	2.72 m/km	2.46 m/km
Número de intervenciones	4	2

- ✓ Los indicadores normalizados de rentabilidad económica (relación VPN/costo y TIR) para las alternativas analizadas confirma que de los proyectos de inversión desde el punto de vista económico es superior la opción de construcción de dos carriles más para el tramo.
- ✓ Los resultados de la evaluación técnica y económica sugieren que existe una muy amplia ventaja de la opción para la construcción de dos carriles.



## Capítulo 6 Estudio de caso: Evaluación de un proyecto de nueva construcción (libramiento)

Este capítulo desarrolla un ejemplo de la evaluación de un proyecto de libramiento que consiste en el análisis de la situación actual o sin proyecto, el análisis de alternativas factibles, descripción de alternativas, la situación con proyecto y la evaluación del proyecto para así determinar su viabilidad técnico-económica con ayuda de HDM-4.

Básicamente la evaluación consiste en un modelo simplificado de un libramiento que consiste en desviar el tránsito vehicular a través de una ruta, en la cual no sea necesario cruzar a través de una ciudad evitando así tiempos de recorrido y congestión, generando los ahorros por costo de operación vehicular haciendo factible este tipo de proyectos.

Se pretende sentar las bases para la evaluación de proyectos de libramiento con el software HDM-4 y así contribuir con las herramientas necesarias para que, en los próximos años, las administraciones de carreteras evalúen de una manera más sencilla y sistemática este tipo de proyectos.



Ilustración 6-1 Proyectos del programa carretero 2007-2012 por subprogramas (Presidencia, 2007).

De acuerdo con el Programa Nacional de Infraestructura 2007, se observa la cantidad de proyectos del tipo de libramientos que se pretendió construir en esta administración. La creciente demanda de este tipo de proyectos nos lleva a la justificación para la elaboración de la investigación.



El propósito del análisis es evaluar los beneficios económicos de la inversión propuesta para el estándar de mejora (construcción de libramiento), la viabilidad económica del proyecto que se evalúa mediante la comparación de la alternativa de proyecto base (conservación normal de la carretera sin proyecto de libramiento)

Y proponer las acciones para conservar el nivel de servicio requerido por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes buscando así que los costos de operación vehicular (COV) se mantengan en niveles bajos y no tiendan a elevarse.

## 6.1 Descripción y detalles del proyecto

El libramiento representa una carretera del tipo primaria o troncal con dos carriles de 3.6 m por sentido formando así un ancho de calzada de 14.4 m, acotamientos de 1.75m construida con una superficie de rodamiento de mezcla asfáltica sobre base granular.

En la parte de abajo se muestra una figura 6.2 con el esquema representativo de la construcción del libramiento y dos tramos que simulan la circulación actual de los vehículos.



*Ilustración 6-2 Esquema de la conformación de los tramos y el libramiento.*

Uno de los principales objetivos, es analizar los beneficios encontrado a raíz de la construcción del libramiento.

## 6.2 Configuración de HDM-4 para un análisis de estrategia

### Parámetros de calibración

- Modelo de tránsito

En la evaluación de proyecto se utilizan dos modelos de tránsito, uno utilizado para la zona urbana (commuter) correspondientes a los Tramos A y B y un modelo de flujo libre (Free Flow) utilizado para el Tramo nuevo C (libramiento).



Ilustración 6-3 Modelo de tránsito (Commuter).

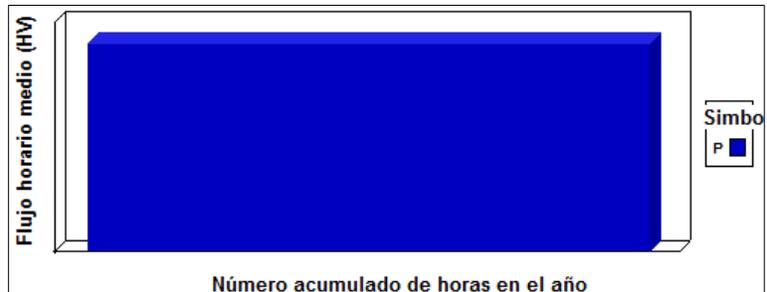


Ilustración 6-4 Modelo de tránsito (Free Flow).

Se utilizaron los datos por omisión que HDM-4 provee para una carretera de 4 carriles (Four Lane Road).

– Tipos de accidentes

En este análisis, no se contempla la evaluación de los efectos de la siniestralidad en el tramo por lo que se asignó una tasa de accidentalidad nombrada (Four Lane Road) que corresponde a 0 accidentes por cada 100 millones de veh-km.

– Zonas climáticas

En la siguiente Tabla se muestran los datos de la zona climática (Subtropical cálido - subhúmedo) utilizados para este análisis que como se sabe, junto con el tránsito, estos factores determinan el nivel de deterioro de los pavimentos.

Nombre:	Subtropical calido - subhumedo	
Clasificación por humedad:	Subhúmedo	
Índice de humedad:	0	
Duración de la estación seca:	6	meses
Precipitación media mensual:	100	mm
Clasificación por temperatura:	Subtropical - cálido	
Temperatura media:	22	°C
Rango prom. de temperaturas:	50	°C
Días con T>32°C:	60	días
Índice de congelamiento	0	°C-día
Porcentaje del tiempo que se conduce en		
Carreteras cubiertas de nieve:	0	0<=PCTDS<=100
Carreteras cubiertas de agua:	10	0<=PCTDW<=100

Ilustración 6-5 Zona climática utilizada para el análisis (Subtropical cálido - subhúmedo).



- Series y juegos de calibración

En el desarrollo de este ejemplo, se creó el juego de calibración llamado Red federal (Carpeta sobre base granular) la cual se aplicó para los Tramos A, B y C este juego de calibración contiene coeficientes de los modelos de deterioro de HDM-4.

### 6.3 Datos del análisis

#### Tramos de estudio:

Lo primero es observar el recorrido que realiza el vehículo a través de la ciudad determinando así la cantidad de tramos y sus características, donde se obtuvieron dos tramos con las siguientes características y un tercer tramo C correspondiente al libramiento.

*Tabla 6.1 Configuración de los tramos utilizados en HDM-4.*

Tramos	Longitud	TDPA	Ancho de calzada	Ancho de acotamientos	Irregularidad IRI (m/km)
Tramo A	18 km	15,000	14.4 m	1.75 m	2.80
Tramo B	14 km	13,800	14.4 m	1.75 m	3.40
Tramo C	28 km	4,500	14.4 m	1.75 m	2.0

#### Flota vehicular:

La distribución en términos de TDPA para las categorías de tráfico utilizados varía entre tramos considerando una serie de crecimiento de 5.0% de incremento anual a partir del año 1 de análisis.

*Tabla 6.2 Flota vehicular representativa utilizada en HDM-4.*

Vehículo	Tipo base HDM-4	Descripción
A	Automóvil mediano	Nissan Sentra modelo 2008
B3	Autobús interurbano	Scania K 380 modelo 2010
C2	Camión mediano	International Navistar 4300 modelo 2010 de 2 ejes
C3	Camión pesado	International Navistar 4300 modelo 2010 de 3 ejes
T3-S2	Camión articulado	International 9200i modelo 2010 con semirremolque de 2 ejes
T3-S3	Camión articulado	International 9200i modelo 2010 con semirremolque de 3 ejes
T3-S2-R4	Camión articulado	International 9200i modelo 2010 con remolque de 2 ejes y semirremolque de 4

## Detalles de proyecto:

La información que aparece en la pantalla general incluye la descripción del estudio, el tipo de análisis, el período de análisis, la red de carretera, flota vehicular y la moneda que se utiliza para el análisis de estrategias.

Ilustración 6-6 Ventana de HDM-4 para la definición de los detalles del programa.

Este análisis se ejecuta por proyecto en donde los tramos se asignan a las alternativas y los estándares a los tramos. El período de análisis inicia en el 2013 con una duración de 20 años (2013-2032), utilizando el peso como la unidad monetaria.

## 6.4 Estándares de trabajo

Para el análisis del proyecto de libramiento se definió un estándar de conservación rutinaria con trabajos de recuperación y carpeta de 7cm con las características mostradas a continuación:

Tabla 6.3 Descripción del estándar de conservación definido para el análisis

Estándar	Descripción
Conservación rutinaria con trabajos de recuperación del pavimento	CRCa7 Recuperación y carpeta de 7cm (Asfalto)

Tabla 6.4 Estándar CReCa7 Recuperación y carpe de 7cm (Asfalto).

Acción	Diseño	Intervención	Costo ec.
(Rec 7) Recuperación y carpeta	Fresado 70mm y Espesor de nueva capa 70mm	Irregularidad $\geq 3.5$ IRI	\$152.48 m <sup>2</sup>
(RS) Riego de Sello	Riego de sello 12mm	Resistencia al deslizamiento $\leq 0.4$ SFC	\$38.61 m <sup>2</sup>
(Bacheo) Bacheo	–	Año $\geq 1$	\$ 307.9 m <sup>2</sup>
(CaSeGr) Calafateo y Sellado de grietas	–	Año $\geq 1$	\$ 36.65 m <sup>2</sup>
(Dre) Drenaje		Año $\geq 1$	Incluidos en diversos
(Div) Diversos		Año $\geq 1$	\$ 17,500 km-año

Para complementar la información anterior debe tenerse en cuenta lo siguiente:

- Las especificaciones de diseño contenidas en los estándares son de carácter general, para efectos de evaluación económica. En la elaboración de los proyectos ejecutivos tales especificaciones necesariamente deben llevarse a detalle.
- En todos los casos se eligió la opción de que HDM-4 estime los efectos de las acciones sobre el comportamiento del pavimento.
- No se ingresaron datos en el apartado relativo a la valuación de activos para ninguna acción.

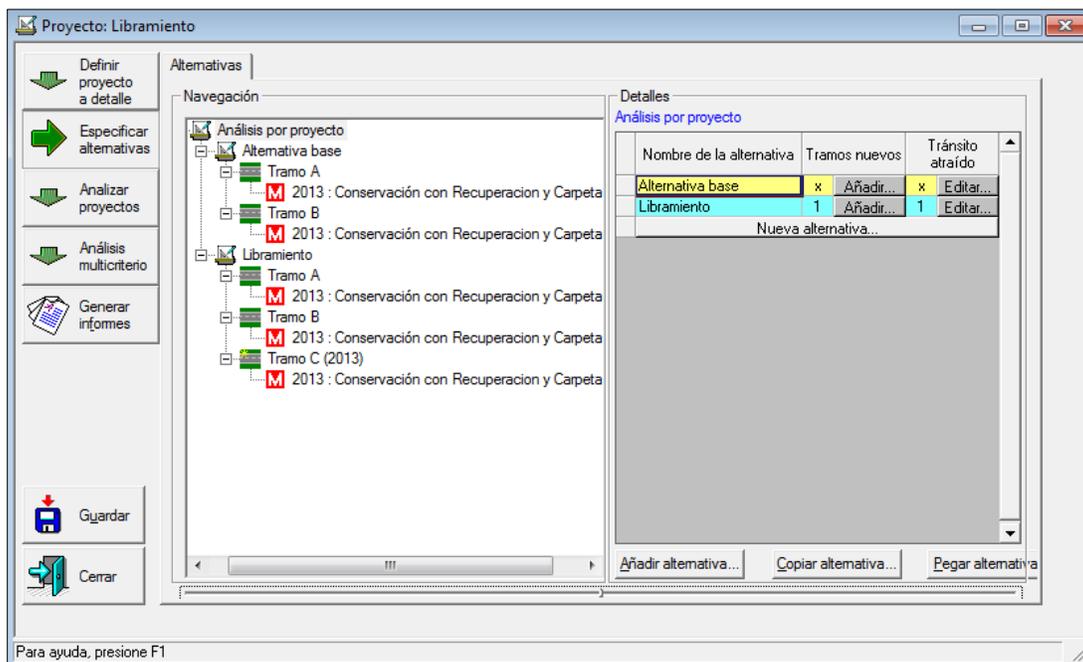


Ilustración 6-7 Visualización de las alternativas aplicadas a los tramos en HDM-4.



## 6.5 Configurar ejecución del análisis y ejecutar corrida

En este análisis se activa la opción de efectuar el análisis económico definiendo así la alternativa base y una tasa de actualización del 12%, no se incluye costos de accidentes ni la inclusión de modelos (Balance energético, emisiones y efectos de aceleración) así también se excluye la sensibilidad del análisis por la falta de datos para este tipo de análisis.

Hacer clic en inicio para comenzar el análisis por proyecto de la alternativa base (Tramos A y B) y el libramiento (Tramos C) obteniendo así la primera parte de los resultados de la corrida en el programa sin restricciones presupuestarias.

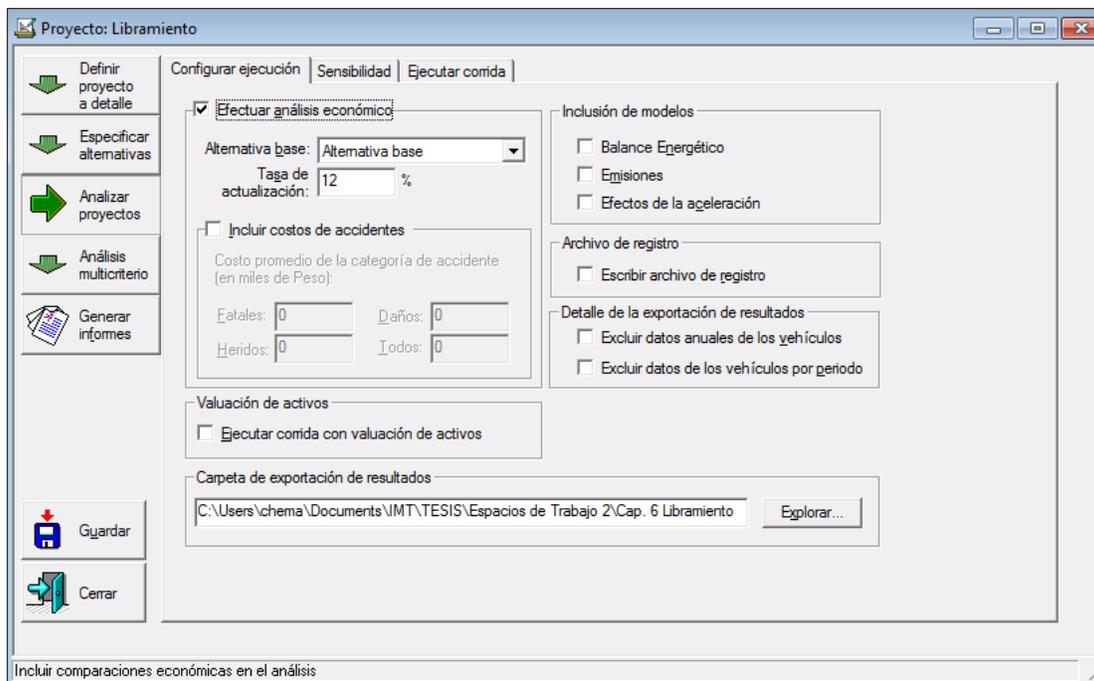


Ilustración 6-8 Configuración de la ejecución del análisis (Proyecto libramiento).

En los análisis de proyecto HDM-4 compara las distintas alternativas de intervención definidas con la alternativa base, mediante un análisis costo/beneficio. Del lado de los costos se incluyen todos los gastos generados por la ejecución de acciones de conservación en función de los umbrales de intervención que se especifican en los estándares de trabajo. Los beneficios consisten básicamente en ahorros en costos de operación vehicular derivados del mejoramiento de la condición de los segmentos por efecto de las acciones de conservación realizadas o en su caso la construcción de un libramiento. Se dice que una alternativa de intervención es rentable cuando los beneficios acumulados durante el período de análisis superan a los costos, lo cual se determina mediante indicadores de rentabilidad como el valor presente neto (VPN) o la tasa interna de retorno (TIR).

En el presente estudio, el análisis con HDM-4 tuvo el propósito de evaluar la rentabilidad de una sola alternativa la cual corresponde a la construcción del libramiento los resultados obtenidos para la opción en términos de costos, beneficios, indicadores de rentabilidad, desempeño del pavimento y capacidad de la vía se observan en los informes generados por HDM-4.

## 6.6 Resultados del análisis del proyecto libramiento

Después de ejecutar el análisis, debemos revisar a detalle y analizar los resultados obtenidos generando los informes de indicadores económicos, evolución de estándares y los resultados de los programas de obra.

A continuación, se presenta una lista de los informes generados por HDM-4.

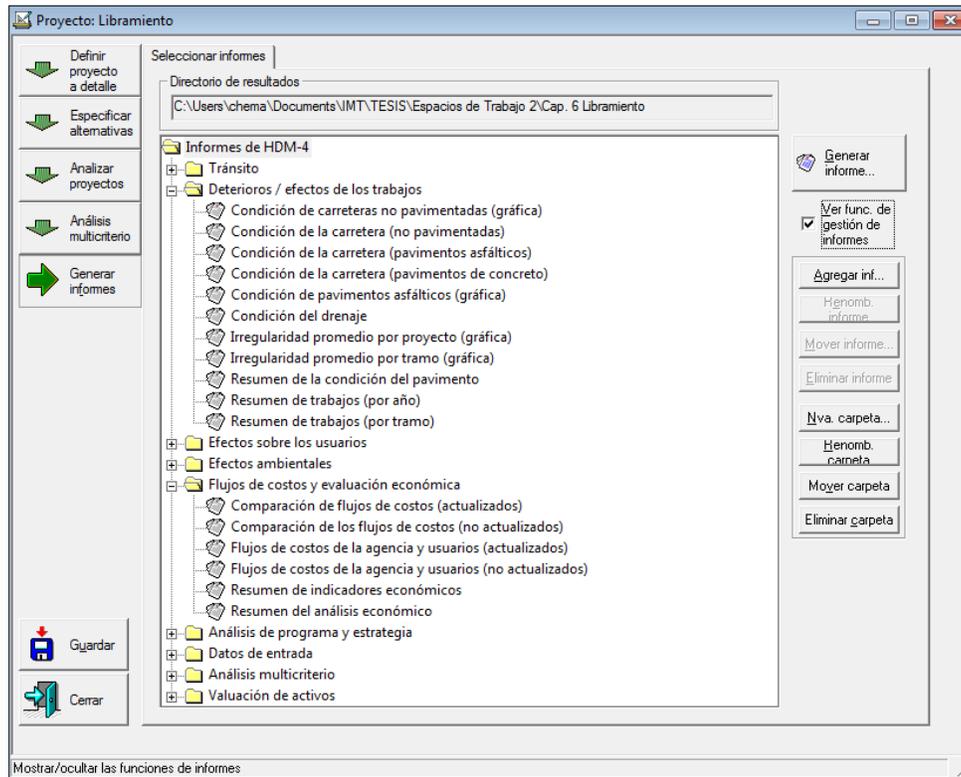


Ilustración 6-9 Resultados e informes generados por HDM-4.

La presentación de los resultados obtenidos se basa en tres de los informes más relevantes de HDM-4.

*Gráfico de irregularidad promedio por tramo.* Presenta la evolución del índice de regularidad internacional (IRI) para cada una de las alternativas definidas. En este gráfico puede apreciarse la evolución de este indicador en el tiempo, incluyendo la recuperación de este por efecto de las acciones de conservación periódica aplicadas. HDM-4 genera uno de estos gráficos por cada tramo que se incluye en el análisis.

*Resumen de trabajos por tramo.* Es un listado de todos los trabajos programados por HDM-4, incluyendo acciones de mantenimiento rutinario, conservación periódica y mejora. Se encuentra organizado por tramos y por alternativa.

*Resumen de indicadores económicos.* Concentra los costos totales en los que incurre la administración de carreteras por la ejecución de las acciones de conservación, los ahorros en costos de usuario producidos por estas mismas acciones y los indicadores de rentabilidad de las alternativas.

Para que un proyecto se realice es necesario que se cumplan dos condiciones del tipo económico y del tipo técnico, por ello el nombre de la evaluación técnico-económica.

Los dos primeros informes dan cuenta del desempeño de las alternativas desde el punto de vista técnico, mientras que el tercero es una síntesis del resultado de la evaluación económica realizada a través del análisis de proyectos.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la corrida del HDM-4 para las alternativas propuestas (base y libramiento) consideradas en el análisis. Al final de la sección se hace una interpretación de los resultados obtenidos.

### Irregularidad superficial (IRI)

En las siguientes figuras se muestran los gráficos de la irregularidad promedio para el tramo A y B con la alternativa base y del libramiento.

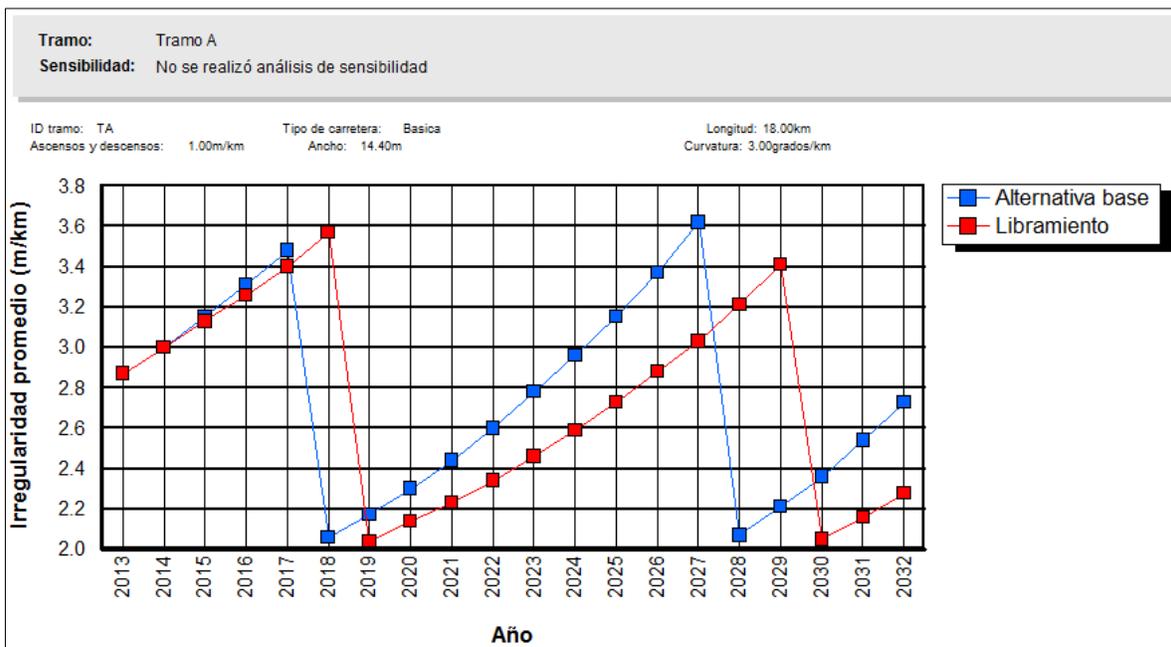


Ilustración 6-10 Gráfica de la irregularidad promedio en (m/km) para el Tramo A.

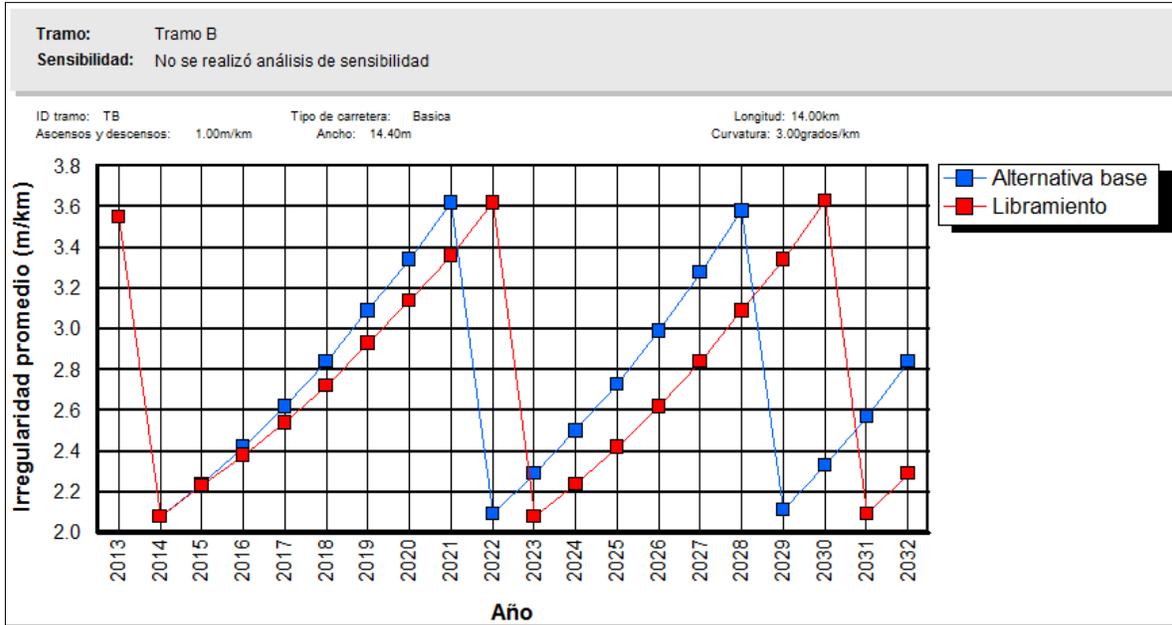


Ilustración 6-11 Gráfica de la irregularidad promedio en (m/km) para el Tramo B.

La siguiente gráfica muestra la irregularidad promedio analizada por proyecto.

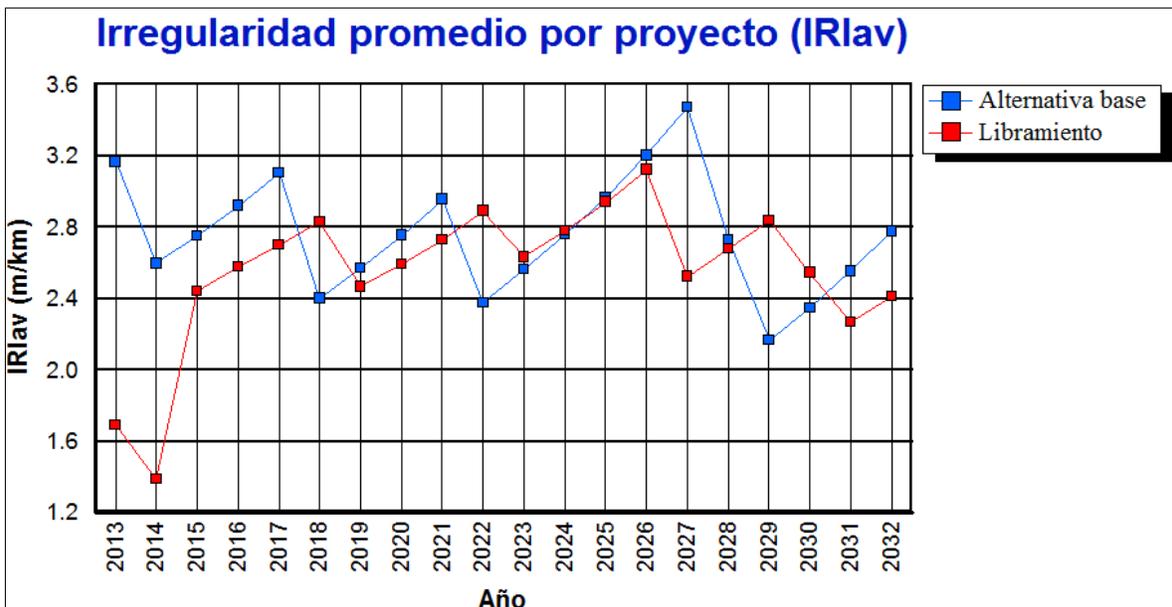


Ilustración 6-12 Gráfica de la irregularidad promedio (Proyecto libramiento).

De los gráficos de IRI por tramo presentados con anterioridad se observar lo siguiente:

- En ausencia de la construcción del libramiento se observa que el IRI muestra un comportamiento más acelerado debido a la carga vehicular.
- Con la alternativa del libramiento el IRI se retrasa ya que toda la carga vehicular se distribuye en los tramos A, B y C.



- El estándar de Conservación con recuperación y carpeta de 7cm, el IRI crece hasta un máximo de 3.6 m/km. Nótese que, aunque las acciones de conservación están diseñadas para evitar que el IRI supere un valor de 3.5 m/km, la ejecución de los trabajos se realiza en el día 1 del año subsecuente al haber ejecutado el criterio de intervención cuando la irregularidad fuera  $\geq 3.5$  IRI.
- Se ejecutan dos acciones de conservación para el Tramo A durante el período de análisis para las dos alternativas y se observan los beneficios de la construcción del libramiento haciendo que el deterioro sea menos acelerado recorriendo las acciones de conservación sobre la vía. De la misma manera se observa el Tramo B donde se realizan 3 acciones de conservación teniendo el mismo efecto de un deterioro más lento cuando se ejecuta el libramiento.
- Al revisar el resumen de trabajos por tramo puede comprobarse que las acciones de conservación periódica realizadas fueron recuperación y carpeta de 7 cm y acciones de conservación rutinaria como diversos, calafateo y sellado de grietas para los dos tramos.
- De la irregularidad promedio por proyecto tenemos que para la alternativa base (conservación), se tiene un IRI promedio de 2.78 m/km mientras que con la alternativa (libramiento), se tiene un IRI promedio de 2.53 m/km, esta diferencia se puede traducir en costos de conservación.



Tabla 6.5 Resumen de trabajos (Alternativa base).

<b>Tramo:</b> Tramo A <b>Alternativa:</b> Alternativa base <b>Sensibilidad:</b> No se realizó análisis de sensibilidad <b>Clase de superficie:</b> Asfáltica <b>Tipo de carretera:</b> Básica <b>Ancho:</b> 14.40m					
Año	Descripción	Código	Costo económico	Costo financiero	Cantidad
2013	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
2014	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
2015	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
2016	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
2017	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Recuperacion 7 cm	Rec7	39,522,816.0	45,847,296.0	259,200.00 sq. m
2018	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
2019	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
2020	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
2021	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
2022	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
2023	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	344,804.1	389,021.8	9,408.02 sq. m
2024	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	344,804.1	389,021.8	9,408.02 sq. m
2025	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	344,804.1	389,021.8	9,408.02 sq. m
2026	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	344,804.1	389,021.8	9,408.02 sq. m
2027	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Recuperacion 7 cm	Rec7	39,522,816.0	45,847,296.0	259,200.00 sq. m
2028	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
2029	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
2030	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
2031	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
2032	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
<b>Costo total del tramo:</b>			<b>86,724,848.3</b>	<b>100,558,679.1</b>	



Tabla 6.6 Resumen de los trabajos (Alternativa Libramiento).

Tramo: Tramo A Alternativa: Libramiento Sensibilidad: No se realizó análisis de sensibilidad Clase de pavimento: Asfáltica Tipo de carretera: Básica Ancho: 14.40m					
Año	Descripción	Código	Costo económico	Costo financiero	Cantidad
2013	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
2014	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
2015	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
2016	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
2017	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
2018	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Recuperacion 7 cm	Rec7	39,522,816.0	45,847,296.0	259,200.00 sq. m
2019	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
2020	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
2021	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
2022	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
2023	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
2024	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
2025	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	344,804.1	389,021.8	9,408.02 sq. m
2026	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	344,804.1	389,021.8	9,408.02 sq. m
2027	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	344,804.1	389,021.8	9,408.02 sq. m
2028	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	344,804.1	389,021.8	9,408.02 sq. m
2029	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Recuperacion 7 cm	Rec7	39,522,816.0	45,847,296.0	259,200.00 sq. m
2030	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
2031	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
2032	Diversos	Div	315,000.0	365,400.0	18.00 km
	Calafateo y Sellado de Grietas	CaSeGr	0.0	0.0	0.00 sq. m
<b>Costo total del tramo:</b>			<b>86,724,848.3</b>	<b>100,558,679.1</b>	

En cuanto a la velocidad promedio de operación de los vehículos se presentan las siguientes gráficas donde se analiza el comportamiento de las velocidades para las alternativas evaluadas.

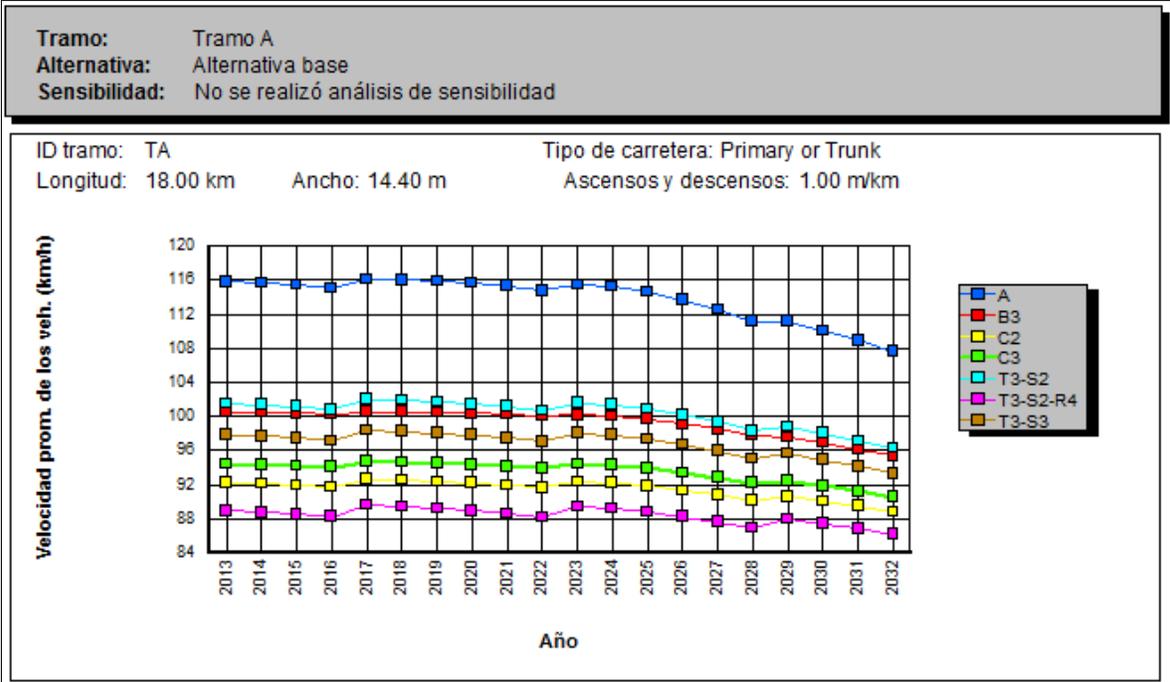


Ilustración 6-13 Gráfica de la velocidad promedio de los vehículos en (km/h) para el Tramo A con la alternativa base.

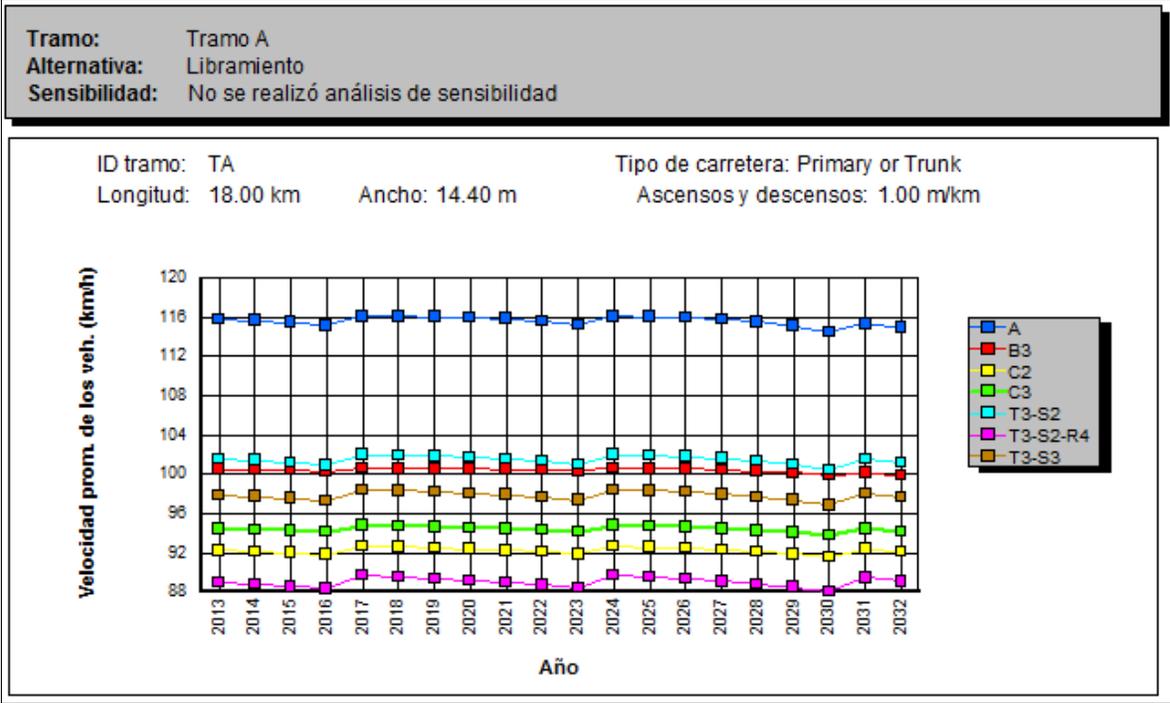


Ilustración 6-14 Gráfica de la velocidad promedio de los vehículos en (km/h) para el Tramo A con la alternativa del libramiento.





## 6.7 Conclusiones de la evaluación de un proyecto de nueva construcción (libramiento)

- ✓ Como primer punto tenemos la irregularidad promedio para los tramos A y B donde se observa que la diferencia entre la alternativa base y la alternativa del libramiento radica en la velocidad de deterioro de los tramos A y B, esto debiéndose a que el tránsito atraído al Tramo C (libramiento). Desde el punto de vista técnico es factible la construcción del libramiento.
- ✓ Otro punto considerado en el análisis es la velocidad de operación de los vehículos donde se muestran los gráficos en las figuras 6.14 para el Tramo A siendo de iguales condiciones para el Tramo B, donde se concluye que la construcción del libramiento descongestiona la ruta existente aumentando la velocidad de operación vehicular y a su vez disminuyendo tiempo de recorrido. Todo esto se convierte en menores costos de operación vehicular (COV). Desde el punto de vista económico es rentable por los decrementos en costos de usuario mostrados en la Tabla 6.7 de indicadores económicos.
- ✓ De los indicadores económicos y otros aspectos técnicos mostrados en la siguiente tabla se obtiene que de los 6 puntos en comparación la alternativa del libramiento es la más rentable.

Tabla 6.8 Comparación de resultados (Proyecto Libramiento).

Resultados	Conservación	Libramiento
Reducción en los costos de usuario	\$0.00 mdp	\$ 875.11 mdp
Valor presente neto	\$ 0.00 mdp	\$ 694.784 mdp
Relación VPN/Costo	0.00	2.689
Tasa interna de retorno	0.00	55.9
IRI promedio por proyecto	2.78 m/km	2.53 m/km
Número de intervenciones Tramo A	2	2
Número de intervenciones Tramo B	3	3

- ✓ Los indicadores normalizados de rentabilidad económica (relación VPN/costo y TIR) para las alternativas analizadas confirma que de los dos proyectos de inversión desde el punto de vista económico es superior la opción del libramiento.
- ✓ Los resultados de la evaluación técnica y económica sugieren que existe una muy amplia ventaja de la opción para la construcción de libramientos. Sin embargo, se requiere un análisis específico para cada proyecto para determinar su viabilidad técnico-económica.



## Capítulo 7 Conclusiones y recomendaciones

En México la utilización de HDM-4 como un modelo de gestión para nuestra infraestructura carretera no había sido muy utilizado por la incertidumbre que le rodeaba. El Instituto Mexicano de Transporte ha sumado esfuerzos para implementar este modelo en proyectos piloto y así comprobar su confiabilidad y efectividad. A raíz de los resultados obtenidos se tuvo un crecimiento y una consolidación a la hora de poner en marcha los contratos plurianuales de conservación de carreteras (CPCC), donde ahora la secretaría pide las corridas en HDM-4 para la planeación de la conservación y la mejora en beneficio de nuestras carreteras.

En suma, HDM-4 resulta una excelente herramienta en la evaluación de proyectos y la planeación de estrategias para la inversión en la infraestructura carretera.

La presente investigación se enfocó, en el desarrollo e implementación de estándares de mejora y nueva construcción para el análisis de estrategias y programas.

Los resultados obtenidos de análisis técnico-económico de un proyecto de reconstrucción que se realizó con ayuda de HDM-4 resultando con mayor rentabilidad la reconstrucción de un pavimento de concreto hidráulico, que pudiera servir como base para el análisis de futuros proyectos.

El estudio de caso para la evaluación técnico-económica con HDM-4 de un proyecto de ampliación de una carretera se obtuvieron los beneficios mencionados a continuación: La rentabilidad de este tipo de proyectos depende principalmente al tránsito diario promedio anual (TDPA), y los beneficios obtenidos se reflejan en el incremento de las velocidades de operación, la reducción de los deterioros presentados en la superficie y con ello menores obras de intervención para la conservación de la vía.

El análisis técnico-económico de la evaluación de la construcción de un libramiento presenta una alta rentabilidad por los ahorros generados de los costos de operación vehicular al desviar el tránsito por una vía alterna ahorrando tiempos de recorrido, se obtiene también el ahorro de la conservación para la irregularidad.

Las recomendaciones que se sugieren para la implementación de HDM-4 es tener la mayor cantidad posible de información para alimentar.



## Bibliografía

- Akitoby, B., Hemming, R., & Schwartz, G. (2007). *FONDO MONETARIO INTERNACIONAL*. Retrieved Enero 30, 2012, from Inversión pública y asociaciones público-privadas: <http://www.imf.org/external/spanish/pubs/ft/issues/issue40/ei40s.pdf>
- Cortés, C. A. (Mayo de 2005). Metodología para la selección de alternativas de conservación de carreteras, usando el modelo HDM-4. *Tesis*. Puebla.
- DGDC. (2009). *Dirección General de Desarrollo Carretero*. Recuperado el 16 de Enero de 2012, de EL SECTOR CARRETERO EN MÉXICO: <http://uac.sct.gob.mx/fileadmin/espanol/anuncio/opusculo.pdf>
- DGDC. (Septiembre de 2011). *Dirección General de Desarrollo Carretero*. Recuperado el 31 de Enero de 2012, de Folleto Asociaciones Público-Privadas: <http://uac.sct.gob.mx/fileadmin/espanol/anuncio/folleto.pdf>
- Federal Highway Administration. (2003, August). *Economic Analysis Primer*. U.S. Department of Transportation, Office of Asset Management. Washington, D.C., EUA: U.S. Department of Transportation. Retrieved Enero 23, 2012, from U.S. Department of Transportation.: <http://www.fhwa.dot.gov/infrastructure/asstmgmt/primer.pdf>
- Kerali, H. G. (2001). Visión General del HDM-4. In H. G. Kerali, *Highway Development and Management. Volume One* (Vol. 1, pp. 6-21). Francia, Paris: PIARC y el Banco Mundial.
- Kerali, H. G. (2002). Visión General del HDM-4. In H. G. Kerali, *Highway Development and Management. Volume One* (Vol. 2, pp. 12-19). Francia, Paris: PIARC y el Banco Mundial.
- Mndoza Puga, L. E., & Moreno Hernández, M. d. (2010, Noviembre-Diciembre). Implementación de un sistema de gestión de pavimentos. *VÍAS TERRESTRES*, 1(8), 8-11.
- Morosiuk, G., Riley, M., & Toole, T. (2006). *HDM-4* (Vol. 2). Paris, Washington, DC., Paris: PIARC.
- Osio Méndez, J. M. (2010, Septiembre-Octubre). Aplicación en México del HDM-4 en la planeación de la conservación de carreteras. *VÍAS TERRESTRES*, 1(7), 24-28.
- Presidencia. (2006). *Plan Nacional de Desarrollo*. Recuperado el 17 de Enero de 2012, de <http://pnd.calderon.presidencia.gob.mx/economia-competitiva-y-generadora-de-empleos/telecomunicaciones-y-transportes.html>
- Presidencia. (Julio de 2007). *Infraestructura*. Recuperado el 24 de Enero de 2012, de PROGRAMA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA: <http://www.infraestructura.gob.mx/pdf/ProgramaNacionalInfraestructura2007-2012.pdf>
- Salgado Torres, M. (2010, Julio-Agosto). Experiencias de aplicación de HDM-4 en América Latina. *VÍAS TERRESTRES*, 1(6), 14-17.



SCT. (19 de julio de 2007). *Secretaría de Comunicaciones y Transporte*. Recuperado el 16 de enero de 2012, de PROGRAMA CARRETERO 2007-2012: <http://www.sct.gob.mx/fileadmin/infraestructura/progcarr.pdf>

Solorio Murillo, R., Hernández Domínguez, R. I., & Gómez López, J. A. (2004). ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS MODELOS DE DETERIORO DEL HDM-4 PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS. *Publicación Técnica*. Queretaro: Insituto Mexicano del Transporte.

Solorio, R., Ortiz, B., Osio, J., & Vazquez, R. (2011, septiembre). ROAD INFRASTRUCTURE QUALITY: ASSET MANAGEMENT AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT. (X. C. Carreteras., Ed.) Cd. México., México.