

Una metodología de optimización económica para la definición de políticas de conservación en pavimentos asfálticos

Por CARLOS VIDELA C., PH. D.
RODRIGO GAETE P., ING. CIVIL



Resulta conveniente pre-seleccionar las alternativas de conservación posibles de aplicar a un pavimento con un determinado estado de deterioro.

Resumen

LOS sistemas de administración de pavimentos utilizan complejos modelos y sofisticadas técnicas de evaluación económica, para la selección de las alternativas óptimas de conservación a aplicar a un gran número de caminos. Esta actividad consume una importante cantidad de recursos humanos y computacionales. Cada nueva alternativa de conservación considerada en el análisis, para un determinado tramo de la red, aumenta significativamente el número de evaluaciones que es necesario realizar con los programas computacionales. De allí la conveniencia de pre-seleccionar las alternativas de conservación posi-

bles de aplicar a un pavimento con un determinado estado de deterioro, y seleccionar para la evaluación final sólo aquellas que presentan una rentabilidad que las haga competitivas a nivel de red.

En este trabajo se presenta una metodología para la asignación de acciones de conservación en pavimentos asfálticos, basada en cuatro premisas fundamentales:

- La mejor alternativa es aquella que maximiza el Valor Agregado Neto (VAN).
- En condiciones de restricción presupuestaria, el máximo VAN para el conjunto no corresponde, en general, a la suma de los máximos individuales.
- Las alternativas válidas se determinan según criterio del "Límite de eficiencia".
- La definición de políticas de

conservación comprende la selección de la acción a materializar y la oportunidad de su aplicación.

La metodología desarrollada se aplicó al caso de recapados asfálticos¹. Se diseñó un factorial de experimentos, considerando como parámetros relevantes el estado del pavimento y su capacidad estructural y la sollicitación de tránsito. La principal conclusión se refiere a la conveniencia de utilizar recapados asfálticos de espesores más bien bajos, en una etapa de la vida del pavimento en que su deterioro no resulta aún evidente.

1. Introducción

Una de las etapas importantes de

1. Extensión de capas de mezclas bituminosas. Refuerzo.

“**L**a principal conclusión se refiere a la conveniencia de utilizar refuerzos asfálticos de espesores más bien bajos, en una etapa de la vida del pavimento en que su deterioro no resulta aún evidente.”

un sistema de administración de pavimentos se refiere a la evaluación económica de las distintas opciones de conservación que pueden ser aplicables a cada tramo que conforma la red. El programa GIMP para la Gestión de la Conservación de Pavimentos Asfálticos (1 y 2), desarrollado por la Pontificia Universidad Católica de Chile para el Ministerio de Obras Públicas, utiliza los programas computacionales HDM-III (adaptado a la realidad nacional) y E.B.M. "Expenditure Budgeting Model" (3) como herramientas para la predicción del deterioro, costos totales de transporte y selección de las alternativas que maximizan el valor actualizado neto bajo condiciones de restricción presupuestaria.

Estos programas computacionales, que permiten el manejo integrado de las numerosas variables consideradas, son complejos y su ejecución consume una significativa cantidad de tiempo, especialmente cuando se realizan evaluaciones a nivel de red. De allí que se consideró conveniente desarrollar una metodología simplificada de selección de alternativas de conservación, por medio de un proceso de pre-optimización económica de las alternativas técnicamente factibles de aplicar y de definición de políticas de conservación para los tramos de una red, según sus características de estado y solicitud.

2. Metodología de pre-optimización

La metodología propuesta consistió en la utilización de modelos de deterioro (4) y de costos de operación vehicular (5), y sistemas de evaluación económica, adaptados a la realidad chilena, que permitieran pre-seleccionar políticas adecuadas de conservación para los distintos caminos, de acuerdo a criterios tanto técnicos como económicos, según las características particulares de cada uno de ellos. Estas características se refieren principalmente a: volumen de tránsito, capacidad estructural y condición del pavimento (Rugosidad² IRI y % de área dañada). Los pasos necesarios involucrados en la aplicación de esta metodología se pueden visualizar en el esquema general de la figura 1 y son los que se describen a continuación:

2.1 Identificación de variables

Esta etapa consistió en identificar las variables más significativas para la gestión del pavimento, encontrar sus rangos de variación, y proponer valores representativos de cada uno de ellos, en base a los cuales se definió los caminos tipo o celdas del experimento factorial. A partir de una revisión bibliográfica (6), se determinaron como más significativas las siguientes variables: volumen de tránsito, capacidad estructural y estado del pavimento (IRI y % de agrietamiento).

2.1.1 Volumen de tránsito

Los niveles o categorías adecuadas para esta variable, se establecieron utilizando los censos que realiza la Dirección Nacional de Vialidad en los caminos de Chile (7). Se consideró un valor mínimo de TMDA³ de 300 veh/día, ya que por debajo de esta cifra generalmente los caminos son no pavimentados, y un valor máximo de

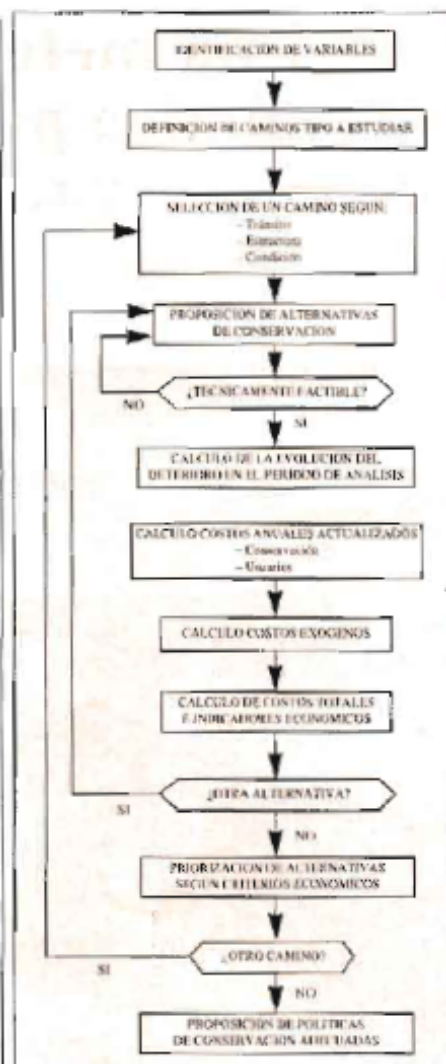


Figura 1. Diagrama de Flujo Metodología de Pre-optimización.

5 000 veh/día (por calzada de dos pistas), ya que por sobre este nivel, comienzan a intervenir en los costos de usuarios otras variables, no consideradas en COPER (5), tales como la congestión vehicular. Además, en este último caso suelen construirse dobles calzadas, con lo cual se baja nuevamente el volumen de tránsito por calzada a valores inferiores al de congestión. Las categorías de tránsito se establecieron de modo que se tuviera una cantidad similar de caminos en cada una de ellas, proponiéndose finalmente las siguientes: ▼

Categoría de tránsito	Rango (veh/día)	Valor representativo TMDA (veh/día)
Bajo	300-700	500
Medio	700-2 000	1 350
Alto	2 000-5 000	3 500

2. Regularidad superficial

3. Tránsito Medio Diario Anual; Intensidad Medio Diario (IMD).

También, a partir de la información de los censos de volúmenes de tránsito, se estableció una distribución porcentual del TMDA por tipo de vehículo, representativa de la situación media del país. Esta distribución, que se aplicó a cada categoría de tránsito se muestra a continuación: ▼

Tipo de vehículo	%
Autos	38.7
Utilitarios	25.6
Camiones simples	15.3
Camiones articulados	12.2
Buses	8.2

La estimación del aumento del flujo vehicular se realizó considerando las tasas de crecimiento establecidas en el informe "Second Road Sector Project 1990-1993", preparado por la Dirección de Vialidad para el Banco Mundial (8), que se muestran a continuación: ▼

Tipo de vehículo	Tasa de crec. (%)
Autos	5.5
Utilitarios	6.0
Camiones simples	2.5
Camiones articulados	6.0
Buses	6.5

El cálculo de los ejes equivalentes que solicitan el pavimento año a año se realizó aplicando los siguientes factores de equivalencia promedio para los vehículos pesados, obtenidos a partir de pesajes realizados en tramos testigo (9). ▼

Tipo de vehículo	Factor de equivalencia
Camiones simples	1.38
Camiones articulados	3.73
Buses	1.42

2.1.2 Capacidad estructural

La variable más adecuada para la estimación de esta propiedad, es el valor de la deflexión Benkelman, ya que esta medida incorpora el efecto del deterioro experi-

TRANSITO (veh/día)		TMDA = 500	TMDA = 1350	TMDA = 3500
IRI=2m/km GR = 0%	D = 0.25			
	D = 0.45			
	D = 0.65			
IRI=4m/km GR = 20%	D = 0.25			
	D = 0.45			
	D = 0.65			
IRI=6m/km GR = 40%	D = 0.25			
	D = 0.45			
	D = 0.65			
Condición del pavimento	Deflexión (mm)			

Figura 2. Factorial de caminos a estudiar.

mentado por el pavimento y de las conservaciones realizadas en su vida de servicio, existiendo una buena correlación entre esta deflexión y el número estructural corregido (10). El valor Benkelman es fácilmente obtenible a partir de las mediciones realizadas con el deflectómetro transitivo*, utilizando las relaciones desarrolladas durante la investigación del "Plan de Control y Seguimiento de Pavimentos Asfálticos" (9). La categorización de esta variable se realizó considerando el rango de deflexiones encontradas en tramos testigo, obteniéndose valores entre 0.15 mm (repavimentaciones sobre hormigón antiguo) y 0.75 mm para los pavimentos más flexibles, seleccionándose las siguientes categorías: ▼

Categoría de estructura	Rango defl. D (mm)	Valor representativo D (mm)
Fuerte	< 0.35	0.25
Media	0.35 - 0.55	0.45
Débil	> 0.55	0.65

2.1.3 Condición del pavimento

La condición del pavimento antes de la conservación, se caracte-

rizó por el valor de su irregularidad superficial (IRI) y el porcentaje de superficie agrietada. Con el fin de incorporar esta variable en el factorial de experimentos, se consideraron tres estados (o condiciones) distintos del pavimento, definidos por los valores que se indican en el cuadro * del pie de página (11).

2.2 Definición de caminos tipo a estudiar

Considerando las tres variables señaladas: tránsito, estructura y condición, y en cada una de ellas tres niveles distintos, se estableció un factorial de 27 caminos tipo para analizar, cuya matriz de celdas se muestra en la figura 2.

2.3 Selección de un camino

Para hacer posible el análisis

detallado de cada situación (celda del factorial), se seleccionó un camino tipo, cada vez, realizándose

Estado	IRI (m/km)	% grietas (%)	Valor repr.	Cuadro *
Bueno	< 3	< 5	IR=2 , 0 % grietas	
Regular	3-5	5-30	IR=4 , 20 % grietas	
Malo	> 5	> 30	IR=6 , 40 % grietas	

los procesos de la metodología de pre-optimización a partir de sus características propias, hasta completar todo el factorial del experimento.

2.4 Proposición de alternativas de conservación

En esta etapa, se propusieron alternativas de conservación técnicamente factibles para el camino tipo analizado, considerándose las siguientes acciones: conservación rutinaria, sellos⁵, refuerzos y reconstrucción.

2.4.1 Conservación rutinaria

Esta acción consideró, además de las actividades rutinarias propiamente tales (drenaje, bermas, control de vegetación, etc), el bacheo del 100% del área que lo requiera, ya que técnicamente es inaceptable la presencia de baches, especialmente por razones de seguridad.

2.4.2 Sellos⁶

Como actividad más representativa de este tipo de conservación, se consideraron los sellos de agregados⁶. Esta intervención se realiza cuando el agrietamiento de la superficie supera un cierto umbral. Para fijar este umbral, es conveniente considerar fundamentalmente aspectos técnicos. Estos se refieren al tiempo que transcurre desde la aplicación del sello hasta que aparecen las primeras grietas, el cual, a su vez, depende del área agrietada que presente la superficie al momento de la intervención. Se ha establecido como umbral de intervención el valor 10%, el cual se encuentra dentro del mínimo detectable visualmente, en forma confiable. Para el sello se consideró un espesor de 12 mm y un coeficiente estructural de 0,1.

2.4.3 Refuerzo

Como actividad más representativa de este tipo de conservación, se consideró la aplicación de capas de concreto asfáltico⁷. La programación de esta conservación se realiza cuando la irregularidad de la superficie supera un cierto valor IRI (umbral de intervención). Se

consideraron distintas combinaciones de espesores (50, 80 y 120 mm) con diferentes valores de IRI (2,5, 3,0, 3,5, 4,0, 4,5 y 5,0). En todos los casos se asignó a la capa de refuerzo un coeficiente estructural de 0,40.

2.4.4 Reconstrucción

Se asignaron distintas alternativas de reconstrucción, según la sollicitación de tránsito del pavimento. Esta intervención se realiza cuando la irregularidad de la superficie supera un umbral de IRI 6. Las estructuras consideradas y sus espesores fueron las siguientes: ▼

Tabla 1 Estructuras de Reconstrucción

Tránsito (veh/día)	Espesores (cm)				
	Capas Asfálticas			Capas Granulares	
	rod.	int.	base asf.	base est.	sub-base
500	7	-	7	15	15
1 350	5	5	6	15	20
3 500	6	5	7	15	25

En el caso de los tránsitos bajos se consideró, adicionalmente, una reconstrucción con doble tratamiento superficial sobre 20 cm de base estabilizada y 20 cm de sub-base granular. Para todas las estructuras se utilizó un valor CBR medio de 7% para la subrasante.

2.5 Cálculo de la evolución del deterioro en el período de análisis

Con las alternativas de conservación señaladas anteriormente, se configuraron estándares de conservación, aplicables a cada camino tipo analizado. Los distintos estándares se definen a partir de la actividad principal considerada, que da nombre al estándar, e incorpora todas las actividades de menor jerarquía que ella. De esta manera, se definieron los siguientes estándares: ▼

- | | |
|--------------------|--|
| a) Rutinaria: | Rutinaria + bacheo |
| b) Sello: | Sello + rutinaria + bacheo |
| c) Refuerzo: | Refuerzo + sello + rutinaria + bacheo |
| d) Reconstrucción: | Reconstrucción + refuerzo + sello + rutinaria + bacheo |

La modelación del deterioro se realizó mediante un programa computacional especialmente desarrollado para estos efectos, el cual utiliza las relaciones propuestas en HDM-III, considerando los ajustes y calibraciones requeridos para el caso chileno. Estas se refieren a la relación número estructural-deflexión (10) y los factores de calibración (4), para los cuales se han considerado valores medios, estimados en base a los resultados de las mediciones efectuadas en tramos testigo. En cada celda se modeló, en primer lugar, el deterioro con una conservación rutinaria, de modo de

constituir la alternativa base y, posteriormente, los deterioros producidos bajo la aplicación de otras alternativas. De esta manera, se generaron los antecedentes necesarios para realizar las evaluaciones económicas. En las tablas 2 y 3 se muestran ejemplos de la evolución del deterioro producido año a año, en un camino de 500 veh/día, estado regular y una deflexión Viga Benkelman de 0,65 mm. La tabla 2 muestra la evolución bajo una alternativa de conservación rutinaria y la tabla 3 con una alternativa de refuerzo con mezcla asfáltica de 80 mm de espesor, aplicada cada vez que la irregularidad superficial supera el valor IRI = 4 m/km.

2.6 Cálculo de costos anuales actualizados

En base a los resultados obtenidos en la etapa anterior, se proce-

5. Riegos de sellado.

6. Riegos de sellado con áridos.

7. Mezcla bituminosa.

**Tabla 2. Evolución del deterioro de un camino.
Alternativa de conservación: Rutinaria**

Tramo: RUT 065-BR		De km: 0		a km: 1								
Superficie: AC		SNC: 2.42										
Año	Ambos sentidos			Total								
	TMDA	FE	SURFCONS	ACRA	ACRW	ARAV	APOT	RDM	RDS	IRI	IRI	MAINTEN
1991	500	143.1	1	1	27.8	16.6	0.0	0.0	2.2	1.1	4.00	4.09
1992	526	150.4	2	2	36.5	24.7	0.0	0.0	2.5	1.1	4.69	5.07
1993	554	158.2	3	3	46.7	34.0	0.0	0.0	2.8	1.2	5.07	5.49
1994	584	166.3	4	4	57.2	44.6	0.0	0.0	3.0	1.2	5.49	5.94
1995	615	175.0	5	5	66.4	55.6	0.0	0.0	3.1	1.3	5.94	6.39
1996	648	184.1	6	6	74.4	65.7	0.0	0.0	3.3	1.3	6.39	6.84
1997	683	193.8	7	7	81.2	74.3	0.0	0.0	3.4	1.3	6.84	7.29
1998	720	204.0	8	8	86.8	82.2	0.0	0.0	3.5	1.4	7.29	7.73
1999	759	214.8	9	9	91.3	88.3	0.0	0.0	3.7	1.4	7.73	8.16
2000	800	226.2	10	10	91.7	93.3	0.0	0.0	3.8	1.4	8.16	8.58
2001	843	238.3	11	11	97.1	97.0	0.0	0.1	3.9	1.4	8.58	9.00
2002	889	251.0	12	12	98.7	98.7	0.0	0.1	4.0	1.4	9.00	9.39
2003	938	264.5	13	13	99.5	99.5	0.0	0.1	4.0	1.5	9.39	10.11
2004	989	278.8	14	14	99.9	99.9	0.0	0.1	4.1	1.5	10.11	10.65
2005	1043	293.9	15	15	99.9	99.9	0.0	0.1	4.2	1.5	10.65	11.21
2006	1100	309.9	16	16	99.9	99.9	0.0	0.1	4.3	1.5	11.21	11.84
2007	1161	326.8	17	17	99.9	99.9	0.0	0.1	4.4	1.5	11.84	12.54
2008	1225	344.6	18	18	99.9	99.9	0.0	0.1	4.4	1.5	12.54	13.31
2009	1292	363.6	19	19	99.9	99.9	0.0	0.1	4.5	1.6	13.31	14.14
2010	1364	383.6	20	20	99.9	99.9	0.0	0.1	4.6	1.6	14.14	15.03

dió al cálculo de los costos de conservación y de los usuarios, año a año, para cada alternativa de tramo.

2.6.1 Costos de conservación

Estos se estimaron de estudios de precios unitarios de las distintas partidas que configuraron las acciones de conservación propuestas para tramos testigo (11). Estos precios están expresados en términos privados, es decir considerando impuestos y otras transferencias. Como la evaluación de proyectos viales debe realizarse en términos de costos sociales, se calcularon estos últimos mediante la aplicación de un factor a los precios privados. El costo de los refuerzos depende fuertemente del espesor considerado. Por esta razón, se estableció la siguiente relación que permite encontrar el costo resultante en función del espesor del refuerzo (11):

$$C_{ref} = 0.3 + 0.81 H_{ref} \quad (1)$$

donde:

C_{ref} : precio social del refuerzo (Dólares/m²)

H_{ref} : espesor del refuerzo (cm)

Además del espesor del refuerzo considerado, debe agregarse un espesor adicional de capa nivelante según el IRI que tenga el pavimento. Este espesor se estima en un cm por cada unidad de IRI, para $IRI \geq 3$ (8). El costo final del refuerzo se calcula con el espesor resultante de incluir la capa nivelante. Para estimar los costos de

**Tabla 3. Evolución del deterioro de un camino.
Alternativa de conservación: Refuerzo**

Tramo: BMD-065-BR		De km: 0										a km: 1	
Superficie: AC		SNC: 5.86											
Año	Ambos sentidos			Total									MANTEN
	TMDA	EE	SURFCONS	ACRA	ACRW	ARAV	APOT	RDM	RDS	IRI	IRI		
1991	500	143.1	1	1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	0.7	1.96	2.29	Refuse
1992	526	150.4	2	2	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.8	2.29	2.38	
1993	554	158.2	3	3	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	0.8	2.38	2.47	
1994	584	166.3	4	4	0.2	0.0	0.0	0.0	2.3	0.8	2.47	2.57	
1995	615	175.0	5	5	1.1	0.0	0.0	0.0	2.4	0.9	2.57	2.67	
1996	648	184.1	6	6	2.2	0.0	0.0	0.0	2.6	0.9	2.67	2.76	
1997	683	193.8	7	7	4.0	0.0	0.0	0.0	2.6	0.9	2.76	2.89	
1998	720	204.0	8	8	6.6	0.0	0.0	0.0	2.7	0.9	2.89	3.04	
1999	759	214.8	9	9	10.2	2.5	0.0	0.0	2.8	0.9	3.04	3.22	
2000	800	226.2	10	10	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	0.9	3.19	3.39	
2001	843	238.3	11	11	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	1.0	3.39	3.42	
2002	889	251.0	12	12	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	1.0	3.42	3.54	
2003	938	264.5	13	13	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	1.0	3.54	3.66	
2004	989	278.8	14	14	1.4	0.0	0.0	0.0	3.1	1.0	3.66	3.81	
2005	1043	293.9	15	15	5.4	0.0	0.0	0.0	3.2	1.0	3.81	3.99	
2006	1100	309.9	16	16	12.1	4.5	0.0	0.0	3.2	1.0	3.99	4.28	
2007	1161	326.8	17	17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.2	4.03	4.09	
2008	1225	344.6	18	18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.2	4.09	4.16	
2009	1292	363.6	19	19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.2	4.16	4.23	
2010	1364	383.6	20	20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.2	4.23	4.31	

las restantes acciones de conservación, se usaron los siguientes precios sociales: ▼

- consumo de neumáticos
- consumo de repuestos y horas de mantenimiento

Tabla 4 Precios Sociales de Acciones de Conservación

Acción de conservación	Unidad	Precio social
Rutinaria	Dólares/km	402
Bacheo	Dólares/m ²	7.00
Sello de agregados	Dólares/m ³	1.67
Reconstrucción:		
tránsito bajo (trat. superficial)	Dólares/m ²	11.3
tránsito bajo (concreto asfáltico)	Dólares/m ²	17.9
tránsito medio	Dólares/m ²	20.8
tránsito alto	Dólares/m ²	23.9

2.6.2 Costos de usuarios

Estos se refieren a los costos en que incurren los usuarios por la

- depreciación e intereses
- tiempo de pasajeros y tripulación.

“**L**a reconstrucción se realiza cuando la irregularidad de la superficie supera el umbral de IRI 6.”

operación de sus vehículos sobre un pavimento. Estos costos se pueden resumir en las siguientes componentes:

- consumo de combustibles y lubricantes

Para estimar estos costos se utilizaron las relaciones propuestas en el modelo VOC desarrollado en Brasil, a las cuales se les realizó una adaptación y calibración para las condiciones de Chile (5). Estos costos varían en forma directa con la irregularidad superficial que presenta el pavimento. Con el objeto de disponer de un modelo aislado que permitiera efectuar estos cálculos en forma expedita, se procedió a efectuar pases del programa GIMP (11), para tener varios valores de costos de usuarios de los diferentes tipos de vehículos en función del IRI que presente el pavimento. Los vehículos considerados fueron de cinco tipos: automóviles, utilitarios, camiones simples, camiones articulados y buses. Los costos de usuarios se calcularon a partir del vector de precios proporcionado por la Dirección Nacional de Vialidad (11). Se procedió posteriormente a ajustar modelos que permitieran predecir el Costo de Operación (CO) de cada tipo de vehículo en dólares/1 000 veh-km, en función del nivel de IRI del pavimento, obteniéndose las siguientes relaciones: ▼

$CO = 141.461 + 0.177 IRI + 0.655 IRI^2 - 0.009 IRI^3$	para automóviles	(2)
$CO = 152.908 - 1.31 IRI + 1.342 IRI^2 - 0.031 IRI^3$	para utilitarios	(3)
$CO = 218.785 + 22.707 IRI + 0.854 IRI^2 - 0.035 IRI^3$	para camión simple	(4)
$CO = 556.011 + 22.828 IRI + 3.333 IRI^2 - 0.131 IRI^3$	para camión artíc.	(5)
$CO = 595.157 + 7.122 IRI + 4.502 IRI^2 - 0.137 IRI^3$	para buses	(6)

Todas las ecuaciones anteriores tuvieron ajustes muy satisfactorios (R^2 prácticamente igual a 1.00). En la figura 3 se muestran y comparan estos ajustes para cada tipo de vehículo.

2.6.3 Cálculo de costos exógenos

Existen costos adicionales a los de conservación y de usuarios, para los cuales el Banco Mundial no ha desarrollado formulaciones especiales, dejando la opción de incluirlos en forma exógena por el usuario si lo estimara conveniente. Entre estos costos se encuentran los de accidentes, contaminación, congestión y valor de rehabilitación de la condición del pavimento al término de su vida útil. La

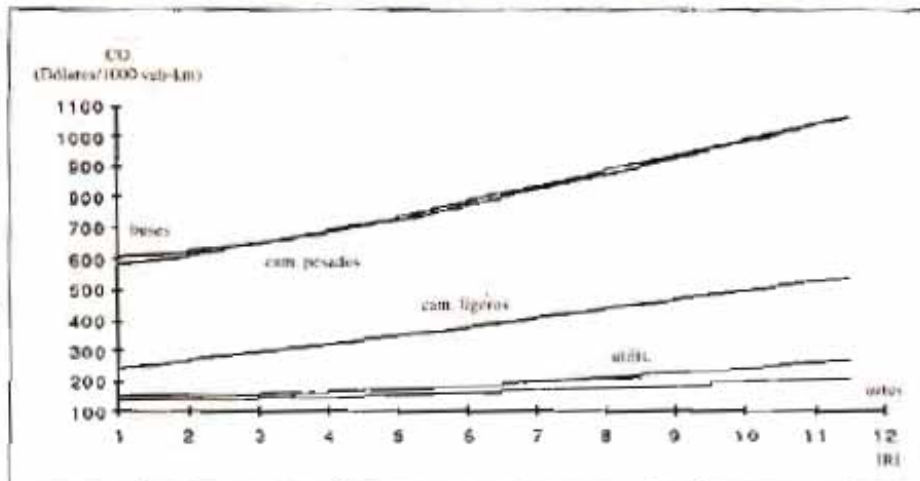


Figura 3. Comparación de Relaciones de Costo de Operación de los Vehículos - IRI.

metodología de cálculo utilizada consistió en estimar el costo necesario que se debería incurrir al término del período de evaluación para devolverle al pavimento su índice de servicio inicial, y una capacidad estructural suficiente, de acuerdo al tránsito solicitante, para soportar un nuevo ciclo de evaluación. Este cálculo se realiza con fines netamente comparativos entre alternativas, ya que no significa que necesariamente deba realizarse esa rehabilitación al final del período de evaluación. Esto per-

mite, entre otras aplicaciones, la amortización de conservación realizadas en los últimos años del período de evaluación.

2.8 Priorización de alternativas a nivel de tramo

que permiten seleccionar las conservaciones económicamente más adecuadas. En base a los indicadores económicos obtenidos en la etapa anterior, se escogió, para cada camino o celda, aquellos estándares de conservación que fueran más convenientes de realizar, según criterios de optimización del uso de estos recursos. De acuerdo a una revisión bibliográfica efectuada (12 y 13), existe bastante consenso sobre las alternativas más convenientes de realizar, que son aquellas que presentan el mayor valor actualizado neto (VAN), ya que este indicador refleja de mejor forma el aumento de la riqueza del país, debido a la realización de los proyectos. Lo anterior es válido en la medida que no existan restricciones presupuestarias. Como en la práctica los fondos destinados a conservación son limitados, deben seleccionarse otras opciones adicionales que involucren menores recursos de capital, tratando de que el VAN disminuya lo menos posible.

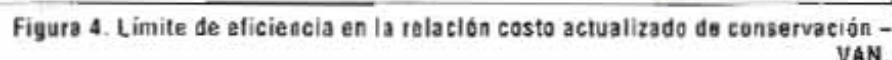
Una solución al problema anterior, se presenta en la figura 4. En dicho gráfico, cada punto representa el par Costo actualizado de conservación-VAN, de cada alternativa de conservación, para un mismo camino. Si se traza un polígono hacia la izquierda que una los puntos con mínima pérdida de VAN, se obtiene una trayectoria, que se conoce como "límite de eficiencia" (14). En el gráfico se

2.7 Cálculo de costos totales e indicadores económicos

A partir de las relaciones propuestas en las etapas anteriores, se desarrolló un programa de cálculo que permite estimar dichos costos año a año, tanto para la alternativa de conservación rutinaria, como para los otros estándares de conservación. Con estos resultados se obtuvieron los indicadores económicos (costos actualizados, Valor Actualizado Neto, Tasa Interna de retorno, Razón Beneficio/Costo), para efectuar las comparaciones

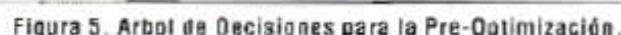
El ejemplo de la figura 4 corresponde a la celda caracterizada por: un camino con un volumen de tránsito medio diario de 500 veh/día, deflexión de 0.65 mm y un estado regular del pavimento (IRI = 4 y Grietas = 20%). Del gráfico se puede apreciar que la alternativa que presenta el mayor VAN (152.2 miles de dólares), es la aplicación de un refuerzo de 50 mm cuando la condición del pavimento alcance un IRI igual a 2.5 m/km, con un costo actualizado de conservación de 88.2 miles de dólares. A partir de este punto, la alternativa que produce la trayectoria más horizontal hacia la izquierda del gráfico corresponde a un refuerzo de 50 mm cuando la condición del pavimento alcance un valor de IRI de 3.5 m/km. El valor del VAN respecto a la alternativa óptima se ha reducido a 146.5 miles de dólares (-3.8%), mientras que el costo actualizado de conservación se ha reducido a 74.2 miles de dólares (-15.9%). Es decir, se pueden escoger alternativas que producen una pequeña disminución de VAN, pero reduciendo en un porcentaje significativamente mayor los costos involucrados en la conservación. Continuando la trayectoria en el "límite de eficiencia", se llega al punto correspondiente a un refuerzo de 50 mm cuando el IRI del pavimento alcanza a 5 m/km. El VAN resulta 132.6 miles de dólares con una reducción del 12.9% respecto del óptimo, mientras que los costos de conservación alcanzan a 54.6 miles de dólares (-38.1%).

La metodología descrita en los párrafos anteriores se aplicó a los 27 caminos tipo que configuran el



4. Aplicación a nivel de una red

Para seleccionar las alternativas de cada tramo que maximizan el valor presente neto total para la red, sujeto a determinadas restricciones de presupuesto, se utiliza el modelo EBM (Expenditure Budgeting Model). Esta herramienta es un programa computacional capaz de seleccionar una combinación óptima de alternativas de proyectos, sujeto a condiciones de restricciones presupuestarias durante multi-períodos de evaluación. El modelo EBM toma en cuenta, para la asignación óptima, los recursos consumidos tanto del tipo capital, como recurrente, y el valor



“Los caminos con tránsito alto requieren que los refuerzos se efectúen cuando se encuentren en mejor condición (IRI=3) que los caminos con tránsito bajo (IRI=4.5).”

actualizado neto VAN obtenido de la implementación de cada alternativa de tramo. Con la condición de que solamente se puede escoger una alternativa para cada tramo de la red, el programa selecciona la combinación óptima que maximiza el VAN para la red en su conjunto, para una tasa de descuento especificada, y a la vez, satisface las restricciones de presupuestos definidas en el período de evaluación. Para la resolución matemática de las relaciones que definen el problema de optimización, el modelo EBM dispone de tres métodos: i) enumeración total (TOTE), ii) gradiente efectivo (AHMED) y iii) programación dinámica. Los métodos del gradiente efectivo y programación dinámica dan una solución bastante aproximada a la óptima global que se obtendría mediante la aplicación del método TOTE, pero con un esfuerzo computacional significativamente menor, lo que permite su uso en el caso de tener una red a evaluar con un número mayor de tramos. Para los métodos anteriores, sólo los de enumeración total y del gradiente efectivo están disponibles para computadores personales.

4.2 Ejemplo de optimización de una red sin utilizar políticas pre-optimizadas

Una de las etapas finales de la investigación “Estudio para la Evaluación de la Eficacia de la Conservación en Pavimentos Asfálticos” consistió en la aplicación del sistema de gestión de la conservación de pavimentos GIMP, a una región piloto del territorio de

Tabla 5. Definición de Políticas de Conservación				
CAMINOS CATEGORIA A				
ACCION		POLITICA		
1. Rutinaria (+ bacheo)		bacheo 100%		
2. Resello (bacheo + sello)		bacheo 100% sello > 30%		
3. Refuerzo (bacheo + sello + refuerzo)		bacheo 100% sello > 30% refuerzo* IRI > 4.0		
* 3 estándares de refuerzo:		40 mm	sl	h req ≤ 40 mm
		70 mm	sl	40 mm < h req ≤ 70 mm
		100 mm	sl	70 mm < h req
CAMINOS CATEGORIA B				
ACCION		POLITICA		
1. Rutinaria (+ bacheo)		bacheo 100%		
2. Resello (bacheo + sello)		bacheo 100% sello > 50%		
3. Refuerzo (bacheo + sello + refuerzo)		bacheo 100% sello > 50% refuerzo* IRI > 4.5		
* 3 estándares de refuerzo:		40 mm	sl	h req 40 mm
		60 mm	sl	40 mm < h req ≤ 60 mm
		80 mm	sl	60 mm < h req

Chile. Se seleccionó como zona para la prueba del sistema, a la red vial de la Región de Valparaíso (11). La red vial básica de la Región de Valparaíso, comprende aproximadamente 1 272 kilómetros de carreteras según distintas categorías dependiendo de su importancia. De este total de kilómetros de caminos, se seleccionaron para la evaluación solamente los que tenían una superficie mayoritariamente con material asfáltico. Estos caminos fueron previamente sometidos a un proceso de tramitación en sectores que tuvieran características homogéneas de tránsito, condición superficial (IRI, grietas, ahuellamiento* y baches) y capacidad estructural (deflexión).

Se propusieron las alternativas de conservación a evaluar, para cada uno de los tramos que componen la red. Estas alternativas, se conformaron de acuerdo a criterios de umbrales de intervención obtenidos principalmente de una recopilación bibliográfica de las normas utilizadas en otros países. Se consideraron en principio dos categorías de caminos, A (principales) y B (secundarios) según su importancia, para los que se propusieron los umbrales de interven-

ción que se muestran en la *Tabla 5*. La determinación del espesor del recapado, se realizó de acuerdo a la capacidad estructural existente en el tramo a evaluar.

Con estos criterios se seleccionó el conjunto de alternativas a evaluar para cada tramo de la red y se efectuó la modelación del deterioro y la evaluación económica. Como producto de estos procesos, se generaron tres tipos de archivos de salida: reportes de las condiciones anuales de los caminos, resumen de costos y comparación entre alternativas, y archivo de datos para el posterior pase del EBM. Adicionalmente, se calcularon como costos exógenos los correspondientes a la rehabilitación al término del período de evaluación. Una vez obtenido el archivo definitivo de datos de entrada para el pase del programa EBM, se procedió a realizar la optimización de la asignación de recursos para la red.

El análisis se efectuó para distintos niveles de recursos disponibles, obteniéndose distintas selecciones de alternativas de tramos, y valor presente neto total para la red, para cada una de ellas. En la

8. Roderas.

figura 6, se muestra la curva que representa el VAN total de la red, para cada nivel de gasto. Esta curva también nos da un indicador de la variación de nuestra función objetivo (bienestar social), con el presupuesto disponible, o "límite de eficiencia a nivel de red".

4.3 Optimización de una red mediante el uso de políticas pre-optimizadas

Con el objeto de poder evaluar la eficiencia de utilizar políticas pre-optimizadas de conservación obtenidas de la aplicación de la metodología propuesta, se procedió a efectuar un pase del programa para la misma red mediante la aplicación de estos últimos criterios. Los pasos ejecutados fueron los mismos que para el caso anterior, con la excepción de las políticas a aplicar en la red. En la figura 6, se muestra una comparación de las curvas "límite de eficiencia de la red" para ambas situaciones.

Al comparar los resultados de ambos procesos de optimización, se aprecia un significativo aumento del valor presente neto total para la red cuando se utilizan políticas pre-optimizadas, independientemente del monto de recursos de conservación disponibles. Por otra parte, se observa que para obtener un mismo VAN total para la red, se requiere un monto significativamente menor de recursos de conservación cuando se utilizan políticas pre-optimizadas.

5. Conclusiones



Especialmente en las alternativas con primera prioridad, se puede ver que los recapados con espesores pequeños, aplicados en el momento oportuno, resultan más rentables en la mayoría de los casos.

Se ha propuesto una metodología que permite pre-optimizar las distintas alternativas de conservación, aplicables a un pavimento asfáltico en un determinado estado de deterioro, de modo de seleccionar para la evaluación final, solamente aquellas que presenten una rentabilidad que las haga competitivas a nivel de red.

En general, especialmente en las alternativas con primera prioridad, se puede ver que los recapados con espesores pequeños (50 mm), aplicados en el momento oportuno, resultan más rentables en la mayoría de los casos, independientemente del nivel de tránsito que circula por el camino, de la capacidad estructural del pavimento original (valor de la deflexión Benkelman) y de su condición antes del recapado (irregularidad superficial y agrietamiento).

Al revisar los recapados de las opciones de segunda prioridad, se puede ver que el espesor requerido tiende a aumentar. Es decir, si se difiere la aplicación del recapado, aumenta el espesor que optimiza la evaluación económica.

El momento más oportuno para la intervención (condición de respuesta), resulta cuando la irregularidad superficial alcanza valores IRI entre 3 y 4.5 m/km. Los caminos con tránsito alto requieren que los recapados se efectúen cuando se encuentran en mejor condición (IRI=3) que los caminos con tránsito bajo (IRI=4.5).

El contar con políticas de conservación preoptimizadas, permite por una parte simplificar el proceso de asignación de alternativas de conservación y, por otra, mejora los indicadores económicos al aumentar el bienestar social para un mismo monto de recursos disponibles.

Es necesario señalar que la metodología que se ha seguido y por lo tanto las conclusiones que de ella se obtengan, está basada en la evaluación económica de costos de conservación, de usuarios y de re-

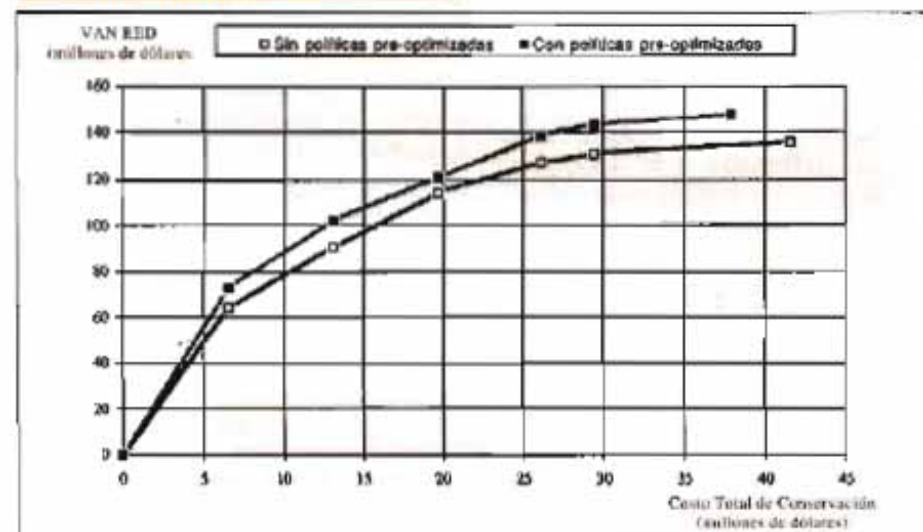


Figura 6. Optimización a nivel de red.

habilitación, considerando que todos los aspectos técnicos involucrados se han incluido de acuerdo a las especificaciones correspondientes. Deterioros del pavimento debidos a fallas de carácter técnico requerirán conservaciones especiales, que apunten a la solución de la falla específica que los produce.

6. Referencias

1. Caroca, A.; Espinoza, F.; Echeverría, G.; Videla, C. "El Programa GIMP para la Gestión de la Conservación de Pavimentos Asfálticos, Parte I: Aspectos Conceptuales". 6º Congreso Iberoamericano del Asfalto, Santiago, Chile, noviembre 1991.
2. Espinoza, F.; Caroca, A.; Echeverría, G.; Videla, C. "El Programa GIMP para la Gestión de la Conservación de Pavimentos Asfálticos, Parte II: Aspectos Computacionales". 6º Congreso Iberoamericano del Asfalto, Santiago, Chile, noviembre 1991.
3. Watanatada, T. et. al. HDM-III: Model Description and User's Manual. The Highway Design and Maintenance Standards Series, Volumen IV Washington. The World Bank, 1985.
4. Gaete, R.; Echeverría, G.; Videla, C. "Sistema de auto-calibración de los modelos de deterioro del HDM-III". 6º Congreso Iberoamericano del Asfalto, Santiago, Chile, noviembre 1991.
5. González et al., "Desarrollo de una Nueva Metodología para la Estimación de Costos de Operación de Vehículos en Carreteras de Chile". Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, Santiago, Chile, 1989.
6. Queiroz, C.; Hudson, W.R. and Hass, R.; "Standardization of Pavement Management Systems in Brasil and other Developing Countries". Transportation Research Board, 71st Annual Meeting, Washington D.C., January 12-16, 1991.
7. Ministerio de Obras Públicas,



El momento más oportuno para la intervención resulta cuando la irregularidad superficial alcanza valores IRI entre 3 y 4.5 m/m.

- cas, "Volúmenes de Tránsitos en los Caminos de Chile". Dirección de Vialidad, Chile, 1988.
8. Armijo, R. y Correa, C.; "Second Road Sector Project", Economic Evaluation, Ministerio de Obras Públicas, File Document, Chile, marzo 1989.
9. De Solminihac, et al. Pontificia Universidad Católica de Chile, Depto. Ingeniería de Construcción, Plan de Control y Seguimiento de Pavimentos Asfálticos: Informe Final, 1989.
10. Echeverría, G.; y Videla, C.; "Evaluación de capacidad estructural efectiva de un pavimento a partir de las medidas de deflexión". 6º Congreso Iberoamericano del Asfalto, Santiago, Chile, noviembre 1991.
11. Videla, et al. Pontificia Universidad Católica de Chile, Depto. Ingeniería de Construcción, "Estudio para la Evaluación de la Eficacia de la Conservación de Pavimentos Asfálticos, Informe Final", 1991.
12. Ministerio de Planificación Nacional. "Metodología de preparación, Evaluación y Presentación de Proyectos de Transporte Caminero". Santiago, Chile, marzo 1991.
13. Fontaine, E.; "Evaluación Social de Proyectos". Instituto de Economía, Pontificia Universidad Católica de Chile, 1980.
14. Harral, C. and Faiz, A. "Deterioro de los Caminos en los Países en Desarrollo: Causas y Soluciones". Banco Mundial, Washington, D.C. Estados Unidos, 1988. ■

Carlos Videla C. y Rodrigo Gaete P.
Dpto. de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Suscríbase a la revista
"RUTAS"

la mejor revista para
técnicos y profesionales.
Boletín de suscripción
en pág. 105