

## Modelos de optimización lineal para realizar planes de inversiones de largo plazo en una red de pavimentos

Ing. Jenny Chaverri Jiménez, MScEng  
Profesora de la Escuela de Ingeniería Civil  
Universidad de Costa Rica  
Coordinadora de Auditoría Técnica en Infraestructura Vial  
LanammeUCR  
jenny.chaverri@ucr.ac.cr  
Ing. Daniel Madrigal Salazar  
Dirección de Planificación Sectorial  
Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT)  
jmadrigs@mopt.go.cr

Fecha de recepción: 30 de octubre del 2010

Fecha de aprobación: Mayo del 2011

### Resumen

Evaluaciones realizadas por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) de la Universidad de Costa Rica en el periodo 2004-2006, han indicado que la Red Vial Nacional de Costa Rica no ha presentado una mejora significativa, por esta razón se realiza una investigación basada en los principios básicos de un Sistema de Administración de Carreteras, en donde se efectúa un plan de inversiones a nivel estratégico a largo plazo (20 años) para los pavimentos. Se toma el caso de estudio de la zona 1-9 (Heredia), donde se generan diferentes escenarios presupuestarios, incluyendo la asignación presupuestaria del año 2007. Se estudia únicamente la estructura de pavimentos; para ello se analizaron inventarios de tránsito promedio diario anual, deflectometría, regularidad superficial, excavaciones a cielo abierto y deterioro visual. Se generó un indicador de condición de pavimento (PCI), curvas de deterioro, los tratamientos a aplicar (mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción) y análisis económicos.

Utilizando técnicas de optimización lineal mediante el programa de computación "Woodstock" de Remsoft Inc., se realizan escenarios de inversión con diferentes presupuestos fijos, así como la estimación del presupuesto requerido anualmente para eliminar las carreteras en mal estado en un periodo determinado. Además, se definen los tratamientos que la red requiere y sus costos bajo el principio de realizar el tratamiento adecuado, en el lugar indicado y en el momento adecuado, esto para maximizar los recursos económicos y mantener los pavimentos en buenas condiciones estructurales y de confort.

Los resultados demostraron que mediante la comparación de escenarios de inversión en el largo plazo a un nivel estratégico, se pueden tomar decisiones más efectivas para la recuperación de una red de carreteras, así como para rendición de cuentas y como instrumento para solicitar más presupuesto. Adicionalmente, el éxito de implementar un Sistema de Administración de Carreteras se debe en gran medida a la estructura organizacional, recurso humano y tecnología.

**Palabras Clave:** Sistemas de administración de carreteras, índices de condición de pavimentos, curvas de deterioro, plan de inversiones, inventario de activos, optimización lineal, nivel de red, nivel de proyecto.

### Abstract

*During the period 2004 – 2006, evaluations executed by the National Laboratory of Testing Materials and Structural Models (LanammeUCR) at the University of Costa Rica indicated that there was no a significant improvement with the road network. This conclusion led to establish this research based on the principles of Asset Management. A long*

*term strategic investment plan (20 years) was developed for pavement structures for the maintenance district 1-9 (Heredia) in Costa Rica. Several investment scenarios were estimated, including the budget assigned by the government for 2007.*

*For the pavement structures it was used inventories such as visual distresses, roughness (IRI), deflection data (FWD), traffic (AADT), layer and material characterization data. A Pavement Condition Index (PCI) was estimated based on deflections and roughness. Also it was used deterioration curves, selection of treatment windows, and economical analyses.*

*By using Woodstock Linear Optimization tool (Remsoft Inc.), several investment plans were developed at the strategic level. Some of these scenarios included different annual budgets, and also the budget required to eliminate the bad roads in 15 years was estimated. The solution includes the type of treatments that need to be applied in specific locations on a year basis and its costs. These results follow the Asset Management principle: to maximize the investment and allocate the resources at the right time, at the right asset, at the right moment, with the objective of maintaining a good level of service.*

*As a result, by using long term investment plans more effective decisions can be taken to recover our assets efficiently. It also can be used for accountability and request of budget. Finally, the key success to implement an Asset Management System is to address the structure of the organization, human resources and technology.*

**Key words:** Asset management system, pavement condition index, deterioration curves, investment plans, asset inventories, lineal optimization, network level, project level

### INTRODUCCIÓN

La Red Vial Nacional de Costa Rica pavimentada tiene una extensión aproximada de 4.757 kilómetros. El sistema de mantenimiento de esta red consiste en dividir el país en 22 zonas, asignando así un monto de mantenimiento por tres años a cada zona mediante una licitación pública. Este modelo se ha ejecutado desde el año 2002.

En los años 2004 y 2006, el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR) ha realizado un inventario de toda la Red Vial Nacional de Costa Rica en donde se

ha medido el Índice de Regularidad Internacional (IRI) y deflexiones mediante un Deflectómetro de Impacto (FWD). Realizando una comparación de los parámetros de IRI y las deformadas para ambos años, se tiene como resultado que la red de carreteras no se ha mejorado de manera significativa. Por el contrario, debido a la carencia de transitabilidad de las carreteras, en el año 2006, no fue posible medir la deflectometría a 1,5% de la red vial nacional y el IRI a 2,4% que se midió en la campaña anterior.

Tanto la asignación presupuestaria a estas 22 zonas de mantenimiento de la red de carreteras de Costa Rica, como las inversiones realizadas, carecen de fundamento en un Sistema de Administración de Carreteras. Mediante estos sistemas administran todos los activos que se encuentran dentro del derecho de vía: pavimentos, puentes, alcantarillado, señalización, etc; los cuales tienen como objetivo realizar las intervenciones en el lugar adecuado, en el momento adecuado y aplicando la alternativa de mantenimiento (tratamiento) adecuada según la necesidad de este activo. Del mismo modo, las decisiones de intervención se ejecutan a través de planes de largo plazo en donde se pueda evaluar el impacto de las decisiones del presente en el largo plazo y se optimicen los recursos disponibles.

El objetivo de esta investigación es realizar escenarios de planes de inversiones en el largo plazo (20 años) únicamente para la estructura de pavimentos, aplicando los principios de un Sistema de Administración de Carreteras. Mediante técnicas de optimización lineal, se formulan diferentes escenarios de inversión. Se usó como escenario base el presupuesto asignado en el año 2007 para la estructura de pavimento a la zona de estudio, y la estimación del presupuesto requerido para recuperar la condición de la red de carreteras para un determinado periodo. Para la ejecución de esta investigación se toma como caso de estudio la zona de mantenimiento denominada zona 1-9 en la provincia de Heredia, la cual es una de las 22 zonas de mantenimiento que administra el Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica (MOPT), a través de la entidad denominada Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI).

Esta investigación se limita únicamente a la estructura de pavimento, excluyendo otros activos de la infraestructura vial como los puentes, alcantarillas, elementos de seguridad vial, etc.

## **Antecedentes**

En el año 2002, el Departamento de Transportes de la provincia de New Brunswick en Canadá (NBDOT) desarrolló una metodología para la implementación del Sistema de Administración de Carreteras en esa provincia. Esto fue realizado en asociación con Xwave Inc, la Universidad de New Brunswick (UNB) y Remsoft Inc,

Como resultado de este trabajo, se generó un índice de condición de pavimentos (PCI) basado en deterioros superficiales, índice de regularidad superficial (IRI) y deflectometría proveniente del deflectómetro de impacto (FWD).

En la actualidad, el Departamento de Transportes de New Brunswick (NBDOT), ha implementado en su gestión de pavimentos su indicador PCI basado únicamente en el IRI y en deterioros superficiales. Mediante el programa de optimización lineal Woodstock de Remsoft Inc. desarrolla sus planes de inversiones de largo plazo, incorporando activos de pavimentos y puentes. El resultado de estos planes de inversión fue que se triplicó el presupuesto anual para sus carreteras.

Mrawira et al (2007) realizó para Costa Rica curvas de deterioro a partir de un PCI basado en el índice de regularidad internacional (IRI) y en deflectometría (FWD), además analiza estrategias de inversión.

El presente artículo tomará como caso de estudio la zona 1-9 definida por los contratos de conservación vial en Costa Rica, con el propósito de desarrollar planes de inversiones de largo plazo y analizar la implementación de esta metodología en Costa Rica. Esta investigación se ejecutó en el LanammeUCR a través de un proyecto de graduación para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil (Madrugal, 2008).

## **METODOLOGÍA**

### **Sistemas de Administración de Carreteras**

Un Sistema de Administración de Carreteras se puede dividir en tres niveles: estratégico, táctico y operacional. El nivel estratégico toma las metas y objetivos generados a un nivel ejecutivo de la organización y los incorpora en la elaboración del plan de inversiones de largo plazo, el cual, se ejecuta con un horizonte mínimo de 20 años. Es indispensable ejecutar análisis en el largo plazo, debido a que de esta manera se podrá

analizar el impacto de las decisiones que se toman en el presente en la red de carreteras.

El siguiente nivel es el táctico, el cual toma los primeros cuatro o cinco años del plan estratégico y analiza a un nivel más detallado las prioridades de intervención generadas por el nivel estratégico y que además incorpora otros aspectos adicionales para la priorización de esas rutas comprendidas en el quinquenio. Finalmente, el nivel operacional es aquel donde se analizan los dos primeros años de intervención a nivel de proyecto, elaborando así los diseños de las rutas a intervenir, análisis económicos, presupuestos y procesos licitatorios.

El nivel estratégico utiliza un nivel de información más general (nivel de red) que la requerida a nivel táctico y a nivel operacional (nivel de proyecto). Adicionalmente, debe realizarse un monitoreo anual de la red y una evaluación de los trabajos ejecutados en el pavimento para determinar sus nuevos índices de condición de pavimentos (PCI); de esta forma se actualiza la base de datos y se pueden actualizar los planes estratégicos a largo plazo y sucesivamente el táctico y operacional.

Un ejemplo de aplicación de estos sistemas en el MOPT-CONAVI sería la ejecución del nivel estratégico por el Departamento de Planificación Sectorial, junto con las metas, políticas y objetivos del Ministro(a) de Transportes y Obras Públicas y el gobierno. El nivel

táctico aplicaría en un Departamento de Planificación del CONAVI (plan quinquenal derivado del plan estratégico) y un nivel operativo que correspondería a las Direcciones de Ingeniería, Obras y Conservación Vial.

### Formulación del índice de condición de pavimento (PCI)

El índice de condición de pavimento PCI ("Pavement Condition Index" por sus siglas en inglés) es uno de los indicadores utilizado para determinar la condición de un pavimento. Existen diversas combinaciones para la cuantificación de este indicador, las cuales pueden contener información estructural, de regularidad superficial y de deterioros superficiales.

Debido a la disponibilidad de información, para esta investigación la formulación del PCI se basó únicamente en las deflexiones (FWD) y la regularidad superficial (IRI). El índice de condición de pavimento propuesto es dado por:

$$PCI = k_1 * SAI + k_2 * PRI$$

Donde, SAI = índice de adecuación estructural derivada a partir de los datos del deflectómetro de impacto FWD, PRI = índice de regularidad superficial del pavimento derivado a partir del IRI, k1 y k2 son factores de peso relativo (seleccionados en este caso como k1 = 0.5 y k2 = 0.5). Se decidió asignar equitativamente un peso del 50% al índice de adecuación estructural y al índice de regularidad superficial.

**Tabla 1** Resultados de retención de contaminantes en una estructura de pavimento flexible con SDGA

Clasificación	PCI <sup>(a)</sup>	Ventana de Operación	Tratamiento <sup>(d)</sup>	Costos en dólares americanos (US\$ / Km / carril)
Muy bueno	80 - 100	Preservación	Sobrecapa MAC <sup>(b)</sup> no estructural (5 cm)	20.000
Bueno	60 - 80	Rehabilitación menor	Sobrecapa MAC <sup>(b)</sup> estructural (6 - 12 cm)	28.000 - 55.000
Regular	40 - 60	Rehabilitación mayor	Sobrecapa MAC <sup>(b)</sup> estructural (12 - 18 cm)	55.000 - 82.000
Pobre	25 - 40	Reconstrucción parcial (Mejoramientos)	CA (13-19 cm) + BE <sup>(c)</sup> 25 cm	98.000 - 126.000
Muy pobre	0 - 25	Reconstrucción total (Reemplazo de la estructura)	1) CA (14 cm) + Be <sup>(c)</sup> 25 cm + subbase 2) Tratamiento superficial	82.000 - 140.000

(a) NBDOT: "New Brunswick Department of Transportation" - Canadá.

(b) MAC: Mezcla asfáltica en caliente.

(c) BE: Base estabilizada con cemento.

(d) No se incluye el bacheo, ya que es una actividad que se aplica en áreas puntuales para mantenimiento de una vía en estado de regular a pobre. No se usan técnicas de preservación de pavimentos como las lechadas asfálticas, debido a que en el país no se aplican (año 2008)

El índice de regularidad superficial del pavimento (PRI) puede ser derivado a partir de los datos medidos de IRI utilizando un perfilómetro láser de alta velocidad. Los valores de PRI para cada sección del pavimento fueron calculados mediante una función normalizadora que traduce cada valor de IRI en una escala de 0 – 100 (Mrawira et al, 2007):

$$PRI_j = 100 \left( \frac{IRI_{max} - IRI_j}{IRI_{max} - IRI_{min}} \right)$$

Donde, PRI<sub>j</sub> es el índice de regularidad superficial del pavimento de la j<sup>th</sup> sección, IRI<sub>j</sub> es el valor medido de IRI para la j<sup>th</sup> sección (tramo homogéneo), IRI<sub>max</sub> e IRI<sub>min</sub> son los valores máximos y mínimos de IRI de todas las secciones en la red vial nacional de Costa Rica para los años 2004 y 2006, para un nivel de confianza del 98%.

El índice de adecuación estructural (SAI) provee una medida de la capacidad de carga o resistencia del pavimento. El SAI (ecuación 4) a utilizar fue desarrollado al tomar la resistencia del pavimento expresada por el parámetro base de deflexiones conocido como "AREA" (ecuación 3) normalizado por la deflexión en el centro de carga, D<sub>0</sub> (la cual se encuentra corregida por temperatura) y luego convertido en un índice escalado entre 0 – 100 por conveniencia para la formulación del PCI.

$$AREA = 150 * \left( \frac{D_0 + 2D_1 + 2D_2 + D_3}{D_0} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Donde; D<sub>0</sub>, D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub> son deflexiones medidas desde el centro del plato de carga del deflectómetro de impacto (FWD) de las ordenadas a 0 mm, 300 mm, 600 mm y 900 mm respectivamente.

$$SAI_j = 100 \left( \frac{AREA_j - AREA_{min}}{AREA_{max} - AREA_{min}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Donde SAI<sub>j</sub> es el índice de adecuación estructural para la j<sup>th</sup> sección (tramo homogéneo), AREA es definida como muestra la Ecuación 3, AREAm<sub>ax</sub> y AREAm<sub>in</sub> son los valores máximos y mínimos del AREA a nivel de toda la red vial nacional de Costa Rica. Nuevamente, para remover los efectos de valores anormales en los extremos, se aplicó un intervalo de confianza del 98%.

La escala de clasificación numérica de la condición del pavimento (PCI) se da en rangos de 0 a 100. Esta consiste en cinco intervalos que van desde muy bueno hasta muy pobre tal y como se muestra en la Tabla 1, la cual indica también las ventanas de operación que aplican y sus costos.

Esta clasificación determina las ventanas de operación del pavimento (clasificado en rangos de PCI), es decir, para una condición determinada, corresponde un tratamiento o medida de conservación del pavimento determinado. Por ejemplo, un pavimento en estado muy bueno requerirá técnicas de preservación de pavimentos, mientras una condición pobre requerirá reconstrucción parcial (mejoramiento).

**Caso de estudio: zona 1-9 de Heredia de los contratos de conservación vial.**

El Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica (MOPT), a través de la entidad denominada Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) ejecuta

mediante contratos, las obras, los suministros y servicios requeridos para el proceso de conservación, mejoramientos y construcción de la totalidad de la red vial nacional.

Para la ejecución de estos contratos (nivel de planificación operacional), esta institución tiene dos departamentos denominados Dirección de Obras y Dirección de Conservación Vial. La primera se encarga de ejecutar los contratos correspondientes a construcción de obras nuevas, mejoramientos (reconstrucciones) y rehabilitaciones de pavimentos y puentes. La segunda se encarga de ejecutar el mantenimiento de los pavimentos y puentes. El mantenimiento realizado en el momento de la ejecución de este estudio a los pavimentos, consiste en ejecutar bacheo con mezcla asfáltica, sello de grietas, sobrecapas asfálticas no estructurales (5 cm) y sobrecapas estructurales. La Dirección de Conservación Vial ha dividido el país en 22 zonas de mantenimiento. La zona de estudio en esta investigación es la 1-9 ubicada en la provincia de Heredia.

Debido a la ausencia de un Sistema de Administración de Carreteras en el Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica (MOPT), se observa en el MOPT-CONAVI un primer problema organizacional, ya que la administración de la red de carreteras de la zona 1-9 aplica tratamientos de bacheo, sellos de grietas y sobrecapas de asfalto a rutas candidatas a otros tipos de tratamientos diferentes a las de preservación, como lo son las reconstrucciones parciales (mejoramientos) y las reconstrucciones totales. Esto se debe a que, la Dirección de Conservación Vial no tiene los mecanismos contractuales para atender aquellas rutas dentro de su zona que sean candidatas a medidas más drásticas como lo son las reconstrucciones parciales (mejoramientos) y las reconstrucciones totales.

Específicamente en la zona de estudio 1-9 de Heredia, se incluirán las otras opciones que se salen del alcance de la Dirección de Conservación Vial, ya que cualquier otro tratamiento que se aplique a rutas candidatas a reconstrucción y rehabilitación mayor, no será efectivo en el mediano y largo plazo. Más allá del alcance o limitaciones contractuales, esta situación se debe analizar desde una perspectiva más amplia, en donde el sistema de administración de carreteras (y en este caso de pavimentos) nace desde un nivel estratégico, el cual formula la estructura organizacional y los contratos de acuerdo con los planes estratégicos y tácticos para la recuperación de la red de pavimentos.

El principio básico de un Sistema de Administración de Carreteras, y en este caso, de pavimentos, es aplicar el tratamiento adecuado de acuerdo con su condición de pavimento, es por esto que en esta investigación se ignora la estructura organizacional actual del CONAVI, y se incluye toda la gama de tratamientos: preservación, rehabilitación menor, rehabilitación mayor y reconstrucción. La razón de esta decisión es que si se tomase en cuenta únicamente las actividades que aplica la Dirección de Conservación Vial, tal y como sucede en la actualidad, en un horizonte de 20 años, no sería posible mejorar la condición de la red vial.

### Construcción de la base de datos espacial para la zona 1-9

La red vial nacional de la zona 1-9 estudiada tiene una longitud de 187,5 km y es parte del Gran Área Metropolitana del país, teniendo así vías urbanas con un uso del suelo habitacional en su mayoría. Aproximadamente el 50% de la red tiene un tránsito promedio diario anual (TPDA) entre 9.000 y 36.000, mientras el otro 50 % tiene vías de tratamiento superficial con un TPDA menor a 2.000.

El tipo de mantenimiento que se ha aplicado a esta red en los últimos 10 años, específicamente al pavimento consiste en la aplicación de mezcla asfáltica en caliente a través de bacheo, sobrecapas de mezcla asfáltica de 5 centímetros y sobrecapas estructurales de mezcla asfáltica. No se ha realizado una reconstrucción parcial o total de estas vías. En el año 2007 se invirtió alrededor de US\$1,5 millones en mezcla asfáltica en caliente, presupuesto que se tomó como referencia en los escenarios de inversión en esta investigación.

La información disponible para la red de la zona 1-9 consistió en datos de regularidad superficial mediante IRI linealmente referenciados y mediciones de deflexión FWD puntuales (con coordenadas). Ambos juegos de información fueron recolectados por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR). Los volúmenes de tránsito fueron tomados del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) de Costa Rica. Los espesores del pavimento fueron tomados de la consultoría realizada al MOPT por la firma BCEOM en 1993 y actualizados por el LanammeUCR.

Con los datos de deflectometría y tránsito, se procedió a generar tramos homogéneos de pavimentos y para cada tramo se procedió a elaborar el índice de condición de pavimento (PCI). La Figura 1 presenta los resultados de PCI para cada tramo homogéneo y el número de ruta.

El PCI promedio de esta red es de 34, clasificándose así como pobre. Esto es un efecto de las medidas de intervención que se han realizado en los últimos años, las cuales no están fundamentadas en un Sistema de Administración de Carreteras. La premisa principal de estos sistemas es aplicar el tratamiento adecuado, en el momento adecuado, en el lugar adecuado. Es aquí que se observa que rutas con un PCI pobre requieren medidas de reconstrucción, sin embargo, aún se

Figura 1 PCI por tramo homogéneo

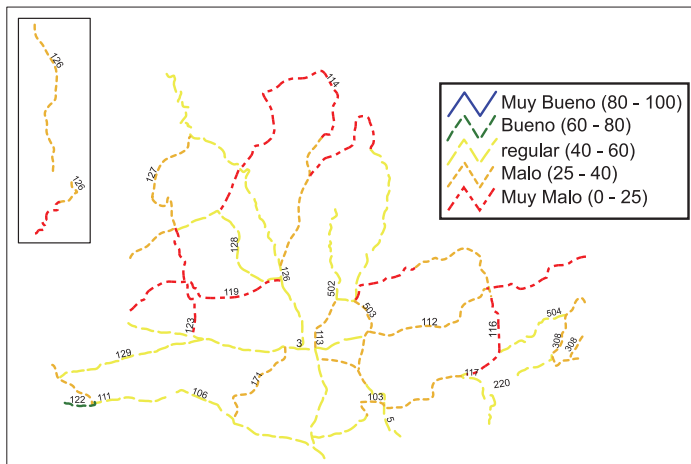


Tabla 2 Escenarios de inversión

Escenario	Función Objetivo	Restricción 1	Restricción 2 <sup>(a)</sup>
1 US\$1.5 mill	Maximizar el PCI	US\$ 1.5 millones por año	TPDA mayor a 9.000 no pueden disminuir su PCI
2 US\$ 3 mill	Maximizar el PCI	US\$ 3 millones por año	TPDA mayor a 9.000 no pueden disminuir su PCI
3 Presupuesto requerido <sup>(b)</sup>	Minimizar la inversión	Eliminar los pavimentos en mal estado en 15 años <sup>(b)</sup>	1. TPDA mayor a 9.000 no pueden disminuir su PCI 2. Costos anuales de inversión no deben variar más de un 5%
4 Sólo reconstrucción	Minimizar la inversión	Eliminar los pavimentos en mal estado en 15 años <sup>(b)</sup>	Solamente tratamiento de reconstrucción

continúa aplicando medidas de conservación como bacheo y sobrecapas de mezcla asfáltica. Se enfatiza la necesidad de implementar un Sistema de Administración de Carreteras con el propósito de mejorar el estado de la red vial y de optimizar la inversión.

## RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

### Plan de inversión de largo plazo

El objetivo de esta investigación es realizar escenarios de planes de inversiones en el largo plazo (20 años) para la estructura de pavimentos. Esto se realizó con herramientas de optimización lineal mediante el programa de computación "Woodstock" de Remsoft Inc. asignando una función objetivo con restricciones tales como el presupuesto, tránsito y el tipo de tratamiento aplicable según la condición del activo. Se requirieron datos de entrada como el inventario de la red (tipo de activo, PCI por tramo, tránsito, curvas de deterioro, tratamientos por ventana de operación y costos). La Tabla 2 muestra los cuatro escenarios de inversión ejecutados.

Se le da prioridad de intervención a rutas con mayor tránsito

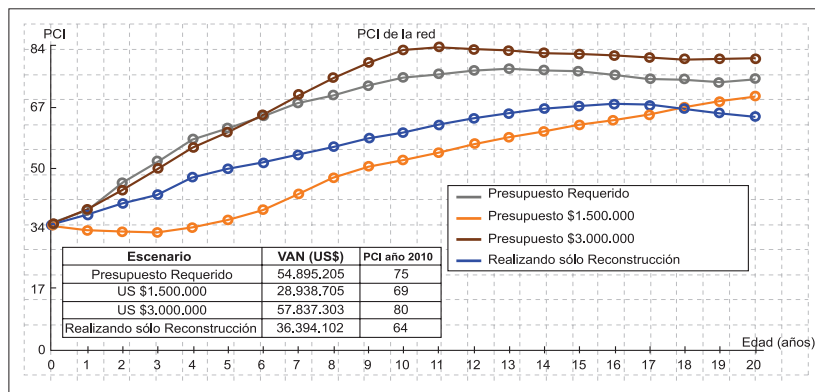
Estima el presupuesto necesario para eliminar los pavimentos en mal estado en 15 años.

En el primer escenario se considera el presupuesto invertido en mezcla asfáltica en caliente en el año 2007 en rubros de bacheo y sobrecapas de asfalto para la zona en estudio. El segundo pretende observar el efecto de duplicar el presupuesto del año 2007 en la red. El tercer escenario pretende realizar una estimación del presupuesto requerido para eliminar los pavimentos en mal estado en 15 años. El cuarto escenario tiene como función objetivo minimizar la inversión (estimar el presupuesto requerido) excluyendo los tratamientos de preservación y rehabilitaciones, es decir, aplicando únicamente reconstrucción; este escenario pretende evaluar el efecto en los costos de inversión si únicamente se realizara reconstrucción, siendo una variación a atender de primero los pavimentos en mal estado.

La Figura 2 muestra el resultado de la optimización lineal por escenario de inversión, junto con el total de inversión para los 20 años en valor presente (VAN) en dólares americanos.

Regresión lineal para las placas: (a) CTB e (b) CTBPC

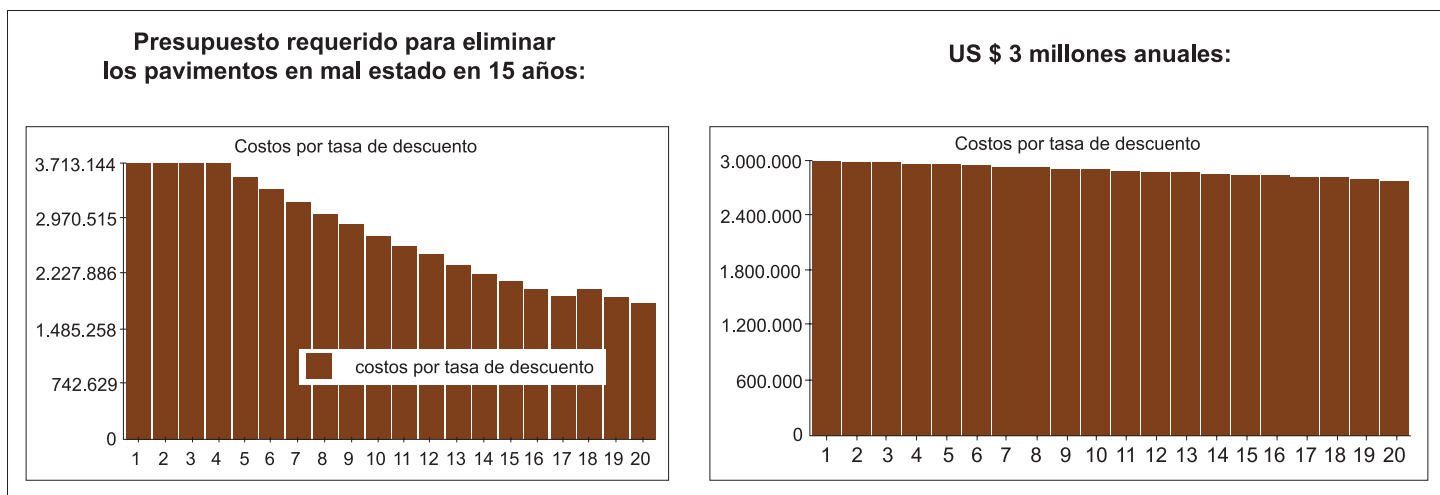
Figura 2



Como se puede observar todos los escenarios tienen un comportamiento ascendente en su PCI. Los dos mejores escenarios con un PCI promedio al final del año son el de invertir US\$ 3 millones al año (PCI de 80 en año 20 – estado muy bueno) y el escenario sin restricción presupuestaria (PCI de 75 en el año 20 – estado bueno). Por otro lado, el escenario de inversión que en la actualidad ejecuta el CONAVI (US\$ 1,5 millones para mezcla asfáltica en caliente en conservación vial) obtiene un PCI promedio de 69, el cual califica como una red en estado bueno (PCI de 60 a 80). El escenario de solo reconstrucción obtiene un PCI promedio de 64 (estado bueno), reflejando la importancia de que al preservar los pavimentos en buen estado se obtiene una red en mejor condición.

Debido a que el PCI inicial promedio de la red es de 34, se clasifica en la ventana de operación en donde se requiere la aplicación de reconstrucción parcial o total en los primeros cuatro años, mientras que los tratamientos de preservación inician a partir del cuarto año. Un PCI de 34 implica que la red se encuentra en un deterioro tan avanzado que la alternativa que se debe aplicar a esas estructuras de pavimentos es de reconstrucción parcial o total. Por lo tanto, las medidas de conservación de bacheo y sobrecapas de mezcla asfáltica que se aplican en la actualidad no son suficientes para recuperar el estado del pavimento a mejores condiciones en el largo plazo, ya que estas alternativas se aplican cuando el PCI es superior a 40.

La Figura 3 muestra la inversión anual en valor presente para los escenarios de presupuesto requerido para eliminar los pavimentos en mal estado en 15 años y escenario de US\$ 3 millones anuales para el periodo de 20 años.



El escenario de US \$3 millones anuales es el escenario que obtiene el mejor PCI al final de los 20 años (PCI de 80), mientras que el escenario denominado "Presupuesto requerido" estima el presupuesto que se necesita para eliminar los pavimentos en mal estado en 15 años. Para este último escenario, se observa una inversión de alrededor de US \$3,7 millones en los primeros cuatro años para realizar reconstrucciones parciales o totales; después del cuarto año, la inversión disminuye. A partir del año 15 se invierte alrededor de US \$1,7 millones por año; presupuesto muy cercano al que el CONAVI invirtió en el año 2007 para mezcla asfáltica.

El escenario de US \$1,5 millones anuales también recupera la red de un estado pobre a bueno, pero con un estándar de calidad más bajo que los demás escenarios, siendo un dato importante en caso que se quiera solicitar mayor presupuesto para obtener una red de carreteras con estándares mayores. Este resultado también indica el efecto positivo de aplicar el tratamiento adecuado de acuerdo con las necesidades reales del activo (aplicar un tratamiento adecuado de conformidad con el estado de ese pavimento, en el lugar adecuado, en el momento adecuado).

Estos escenarios de inversión se obtuvieron a partir de la herramienta Woodstock de Remsoft Inc, la cual ejecutó la optimización lineal y además la programación de rutas y sus tratamientos a aplicar. Esta herramienta tiene la ventaja de combinar y optimizar cualquier tipo de activo: pavimentos, puentes, elementos de seguridad vial, etc.

Los presupuestos presentados en estos escenarios contemplan únicamente las necesidades de la estructura de pavimento y no incluyen la inversión requerida para mejorar los sistemas de drenajes, elementos de seguridad vial, puentes y los demás activos de la carretera. Es posible incorporar estos activos dentro del modelo de optimización, sin embargo, para ello se necesitan los inventarios viales y definir indicadores de condición para cada activo de la carretera. La más grande limitación es la carencia de una base de datos oficial que contenga el inventario de todos estos activos de la carretera.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Uno de los mayores beneficios de los planes de inversión de largo plazo es evaluar el impacto de las decisiones que se toman en el presente en la red de carreteras en términos económicos y de desempeño. Estos planes son una herramienta que facilitan a los niveles ejecutivos de las agencias de transporte a tomar decisiones adecuadas, exponer la transparencia de la inversión de fondos públicos para la rendición de cuentas y a justificar la inversión necesaria que se requiere para poder mantener la red de carreteras en un estado adecuado.

Los escenarios de inversión presentados utilizan las premisas fundamentales de un Sistema de Administración de Carreteras, el cual consiste en aplicar la medida de mantenimiento (tratamiento)

de acuerdo a la condición de este activo, en el lugar adecuado y en el momento adecuado; de esta forma, es posible maximizar la inversión. Otra premisa importante de un Sistema de Administración de Carreteras es que está compuesto por tres grupos: la tecnología, el recurso humano y la estructura organizacional. En esta investigación se aborda únicamente el aspecto tecnológico. Sin embargo, para una implementación exitosa de ese sistema, es necesario incorporar los otros dos aspectos.

El caso de estudio de la zona 1-9 presenta un índice de condición de pavimento (PCI) promedio de 34, el cual se clasifica como un estado de la red en condiciones pobres. Es por ello que todos los escenarios de inversión apuntan a realizar reconstrucciones parciales y totales en esta red en los primeros cuatro años. Posterior a esto, las estructuras reconstruidas se encuentran en buenas condiciones, por lo que se pueden aplicar técnicas de preservación. Incluso el presupuesto invertido en el año 2007 (US\$1,5 millones) obtiene una red en estado bueno en el año 20, no obstante, presenta mayores restricciones de ejecución. Esto se obtiene por aplicar el tratamiento adecuado de acuerdo a la condición que el pavimento presente. Se aclara que estos escenarios de inversión se realizan únicamente para la estructura de pavimento, dejando de lado la inversión necesaria para los otros activos tales como alcantarillas, señalización vial, etc que se requieren al ejecutar un mejoramiento (reconstrucción) de la vía.

El escenario de ejecutar únicamente reconstrucción (PCI 64 - más bajo de todos los escenarios) confirma el concepto de preservación de pavimentos, el cual indica el beneficio de conservar los pavimentos en buen estado y no esperar a intervenirlos cuando ya llegaron a un estado pobre.

En vista de la ausencia en el país de aplicación de lechadas asfálticas como parte del mantenimiento de preservación de pavimentos, se utilizó la aplicación de sobrecapas no-estructurales de 5 cm (políticas vigentes en el año 2008). No obstante, las lechadas asfálticas son de menor costo y muy efectivas para preservar los pavimentos, así como toda la familia de técnicas de preservación (su aplicación depende del nivel de tránsito) por lo que su aplicación puede optimizar aún más la inversión.

Es necesario enfatizar que debido a la ausencia del Sistema de Administración de Carreteras en Costa Rica, la estructura organizacional de CONAVI actual

no es adecuada, debido a que toda la red estudiada es asignada a un departamento que tienen como funciones realizar actividades de conservación de las vías, las cuales, para la estructura de pavimentos consisten en ejecutar bacheos con mezcla asfáltica en caliente, sobrecapas de asfalto estructurales y no estructurales; actividades que se aplican a pavimentos con condiciones de regular a muy bueno (PCI mayor a 40). Es por ello que es imperativo abordar el aspecto organizacional en la implementación de estos sistemas.

El escenario denominado "Presupuesto requerido" permite estimar el presupuesto requerido para obtener un determinado nivel de servicio de la estructura de pavimento, en este caso, eliminar los pavimentos en mal estado en 15 años. El resultado obtenido en esta investigación es factible de ejecutar y es un escenario importante para la solicitud y justificación del presupuesto.

Se recomienda monitorear el desempeño (condición y duración) de las estrategias de mantenimiento y de pavimentos que se han reconstruido en Costa Rica, con el propósito de retroalimentar estos planes de inversión y actualizarlos. Además debe mantenerse un inventario de los activos y el registro histórico de las intervenciones de mantenimiento realizados. Estos aspectos son también parte del Sistema de Administración de Carreteras.

Una de las ventajas para la aplicación de esta metodología para Costa Rica en donde puede existir información limitada, es que para el desarrollo de los planes de inversión se puede utilizar pocas variables de información. La metodología también es una alternativa factible para optimizar los recursos disponibles y solicitar mayor presupuesto.

Experiencias en el Departamento de Transportes de la provincia de New Brunswick de Canadá al implementar el Sistema de Administración de Carreteras y al crear escenarios de inversión como los presentados en esta investigación, dieron como resultado que se triplicara la asignación presupuestaria para los próximos tres años. Como consecuencia de ello, se triplicó la necesidad de consultorías para diseños y la demanda de empresas constructoras para pavimentos y puentes. Evidentemente, la condición de la red de carreteras también está mejorando, así como la satisfacción de los usuarios e imagen del gobierno en turno y del departamento de transportes (ejecución de obras



y rendición de cuentas debido a la eficiencia de la inversión).

Adicional a la estructura de pavimento, la metodología aquí presentada puede incorporar la optimización de otros activos de la carretera tales como puentes, alcantarillas, componentes de la seguridad vial, etc. Para ello, es necesario tener los inventarios de estos activos, el desarrollo de sus curvas de deterioro y el diseño de un indicador de condición.

La meta final es desarrollar planes de inversiones y planificación que integre todos los activos de la carretera. La gestión de la infraestructura vial deberá atender factores de estructuras viales, movilidad (congestión), seguridad vial, vulnerabilidad geotécnica, entre otros. El primer paso es generar una base de datos que integre todos los inventarios viales, incluyendo accidentalidad y que incorpore datos históricos de actividades de mantenimiento que se ejecutan en las carreteras; todos estos referenciados geográficamente.

#### AGRADECIMIENTOS

Se agradece tanto al Departamento de Carreteras de la Universidad de New Brunswick como al Departamento de Transportes de la provincia de New Brunswick de Canadá por la transferencia de tecnología para la ejecución de esta investigación.

Agradecimientos también al Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR) por el apoyo para la ejecución de esta investigación.

Se agradece a los ingenieros Mónica Bolaños y Pablo Torres, quienes aportaron en categoría de asesores, retroalimentación al proyecto de graduación para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil (Madrugal, 2008).

#### Referencias bibliográficas

1. **Amador Luis, Mrawira Donath.** Modelación de desempeño para gestión de infraestructura: Qué hacer cuando solo tiene dos puntos de datos. Universidad de New Brunswick – Canadá. Enero 2008.
2. **Amador Luis, Mrawira Donath, Zhong Ming.** Aplicando un SIG en Transportes para Desarrollar un Modelo de Desempeño de Infraestructura Vial y un Sistema de Planificación a Largo Plazo para una Red de Carreteras; Universidad de New Brunswick – Canadá. Noviembre 2007.
3. **American Association of State Highway and Transportation Officials.** AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C. 1993.
4. **Departamento de Transportes de New Brunswick (NBDOT).** Sistema de Administración de Carreteras para la provincia de New Brunswick de Canadá. 2005.
5. **Haas Ralph, Hudson W. Ronald, Zaniewski John.** Modern Pavement Management; Malabar Florida. 1994.
6. **Haas Ralph, National Project Team.** Pavement Design and Management Guide; Transport Association of Canada; Ottawa Ontario. 1997.
7. **Huang, Yang H.** Pavement Analysis and Design. Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey. 1993.
8. **Instituto del Asfalto.** The Asphalt Handbook Manual Series No. 4 (MS-4), Ed. The Asphalt Institute, Lexington, KY. 1989.
9. **LanammeUCR.** Informe de Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada. Noviembre 2006.
10. **Larry Orcutt, Larry Galehouse, Edward Denehy, Joe Graff.** Guías de mantenimiento preventivo. Fundación para la preservación de pavimentos. 2001.
11. **Madrugal Salazar, José Daniel.** Plan de Inversiones a Nivel Estratégico para la Zona 1-9 de Conservación Vial de CONAVI. Trabajo de Graduación para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica – Costa Rica. Diciembre, 2008.
12. **Peterson Dale.** Life-Cycle Cost Analysis of Pavements, National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice. 1985.
13. **Shahin M.Y.** Pavement Management for Airports, Roads and Parking lots. 2005.
14. **Solminihac Hernán.** Gestión de Infraestructura Vial; Editorial Teleduc. 1998.