

ANÁLISIS ESTOCÁSTICO DEL COSTO DEL CICLO DE VIDA DE TÉCNICAS DE PRESERVACIÓN DE PAVIMENTOS

Natalia Zúñiga-García¹, Wilfrido Martínez-Alonso², Jorge Prozzi³

¹ Universidad de Texas en Austin, Estados Unidos, nzuniga@utexas.edu

² Universidad de Texas en Austin, Estados Unidos, wilfrido.martinez@utexas.edu

³ Universidad de Texas en Austin, Estados Unidos, prozzi@mail.utexas.edu

**Presentado en el XIX Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto (CILA), Medellín,
Colombia, Noviembre 2017.**

Resumen

En este trabajo se presenta la investigación que llevó al desarrollo y la implementación de una metodología estocástica para el análisis del costo del ciclo de vida de las principales técnicas de preservación de pavimentos utilizadas en Texas: tratamientos superficiales, micro-aglomerados y sobrecapas delgadas de mezcla asfáltica en caliente. El análisis se realizó mediante la simulación de Monte Carlo, utilizando información histórica de más de 14000 proyectos de mantenimiento y rehabilitación construidos entre 1994 y 2015, obtenidos de las bases de datos del Departamento de Transportes de Texas (TxDOT). La información sobre la vida efectiva y el costo de los proyectos de mantenimiento preventivo fue utilizada para desarrollar un análisis estocástico del costo del ciclo de vida. El análisis se realizó para distintos tipos de carretera, volúmenes de tránsito y cargas vehiculares. Los principales resultados muestran que los tratamientos superficiales representan la técnica más económicamente eficiente, a pesar de que la vida efectiva de las tres técnicas es similar. Adicionalmente, en carreteras de alta carga vehicular, los tratamientos superficiales y los micro-aglomerados presenta un Valor Presente Neto similar. Si bien la metodología fue implementada con datos de Texas, la misma metodología puede ser aplicada en cualquier país o región y permite establecer predicciones más reales que la alternativa que usa métodos determinantes.

Palabras Clave: análisis económico, costo del ciclo de vida, preservación de pavimentos, mantenimiento preventivo, tratamientos superficiales, micro-aglomerados, sobrecapas delgadas.

1 Introducción

Las carreteras representan un activo de infraestructura crítico para los gobiernos y los ciudadanos y para las agencias de transporte que los administran. La Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE en inglés) ha calificado las condiciones actuales de las carreteras en Estados Unidos con una nota de D+ (en riesgo), que corresponde al puntaje más bajo posible [1]. Adicionalmente, la Administración Federal de Carreteras de EE. UU. (FHWA en inglés) estimó que se necesitan aproximadamente US\$170 billones anuales para mejorar las condiciones y el rendimiento de las carreteras existentes [1].

Una parte importante del presupuesto de las agencias de transporte se asigna a la implementación de técnicas de preservación del pavimento. Estas técnicas se aplican con el fin de extender la vida del pavimento y, en algunos casos, incrementar su capacidad estructural. A pesar de las mejoras en la recolección de datos para la estimación de la vida útil de las prácticas de mantenimiento y rehabilitación, esta información no ha sido utilizada extensivamente [2]. Evidencia empírica ha demostrado que un mantenimiento oportuno es el mejor método para retrasar la tasa de deterioro de un pavimento y, por lo tanto, extender su vida útil, resultando en ahorros importantes de presupuesto que podrían ser destinados para mejorar la infraestructura

vial. Sin embargo, es necesaria la implementación de una metodología estocástica que considere la incertidumbre para cuantificar los beneficios de la aplicación de trabajos de rehabilitación, mantenimiento preventivo, y mantenimiento rutinario.

Este trabajo tuvo como objetivo desarrollar e implementar una metodología estocástica para el análisis del costo del ciclo de vida (CCV), que permita evaluar y comparar secciones de carreteras sujetas a distintas técnicas de preservación de pavimentos, utilizando información del Departamento de Transportes de Texas (TxDOT). Para ello, se analizó la información histórica de más de 14000 proyectos mantenimiento y rehabilitación construidos entre 1994 y 2015. El análisis toma en cuenta distintos tipos de carretera, volúmenes de tránsito y cargas vehiculares.

1.1 Tratamiento de mantenimiento preventivo

La Administración Federal de Carreteras de EE. UU. (FHWA) define la preservación del pavimento como un programa de estrategias a largo plazo empleado en la red vial, que permite mejorar las condiciones del pavimento, implementado una serie de prácticas económicamente eficientes que permiten extender la vida útil del pavimento, y mejorar la seguridad y el confort del usuario [3]. Las prácticas de conservación del pavimento están conformadas por tres componentes principales: rehabilitación menor o no-estructural, mantenimiento preventivo y mantenimiento rutinario [3].

El mantenimiento preventivo consiste en la aplicación sistemática de tratamientos de mantenimiento durante la vida útil del pavimento, que permiten mantener el pavimento en buenas condiciones, extender la vida útil y minimizar el costo del ciclo de vida [4]. La aplicación de tratamientos de mantenimiento preventivo es crucial para el programa de preservación del pavimento. Estos tratamientos son aplicados cuando la carretera se encuentra en buenas condiciones y solamente presenta daños menores. Es decir, antes de que el pavimento presente daños significativos y sea necesaria la colocación de una sobrecapa de refuerzo estructural o el reemplazo total de la estructura. Existen diferentes tratamientos de mantenimiento preventivo para pavimentos de concreto, mezcla asfáltica, y sistemas de drenaje. Las técnicas de preservación analizada en el presente estudio incluyen las principales técnicas utilizadas en Texas para mantenimiento preventivo de pavimentos de mezcla asfáltica: tratamientos superficiales, micro-aglomerados y sobrecapas delgadas de mezcla asfáltica en caliente.

1.1.1 *Tratamientos superficiales*

Los tratamientos superficiales son un revestimiento que consiste en la colocación de material bituminoso (cemento asfáltico o emulsión asfáltica) sobre la superficie del pavimento, seguida de una capa de agregado de tamaño uniforme [5]. Son empleados para sellar pequeñas grietas, impermeabilizar y mejorar la fricción de la superficie. También son utilizados como capa de rodamiento en carreteras de bajo volumen vehicular [5].

1.1.2 *Micro-aglomerados*

Los micro-aglomerados, también conocidos como micro-pavimentos, están compuesto por una mezcla de emulsión asfáltica modificada con polímero, agregado, filler, agua y aditivos. Son colocados sobre la superficie del pavimento para prevenir el desprendimiento de material y la oxidación del asfalto [5]. Es efectivo para mejorar la fricción y rellenar irregularidades menores y corregir ahuellamientos.

1.1.3 *Sobrecapa delgada*

Las sobrecapas delgadas de mezcla asfáltica en caliente consisten en la colocación de una sobrecapa no-estructural de menos de 25 mm de espesor [5]. Se colocan para mejorar la fricción de la superficie, corregir irregularidades y reducir la permeabilidad.

1.2 Análisis del costo del ciclo de vida

El análisis del CCV es un procedimiento para evaluar el costo económico total de un proyecto, analizando costos iniciales y futuros, y tomando en cuenta costos de mantenimiento, uso, reconstrucción, rehabilitación y restauración, sobre el total de la vida útil del proyecto en estudio [6]. El análisis del CCV es una herramienta de apoyo a la toma de decisiones, utilizada frecuentemente por parte de las agencias de transporte, para comparar los costos de diferentes alternativas de proyectos. Es considerado un tipo de análisis costo-beneficio, que consiste en una herramienta de evaluación económica que permite comparar los costos y beneficios de distintas alternativas, permitiendo así la selección de la opción óptima desde el punto de vista económico [7].

1.2.1 Tipos de análisis del costo del ciclo de vida

Existen dos tipos de análisis del CCV: determinístico y estocástico (o probabilístico). Estos métodos difieren en la manera en la que es considerada la variabilidad e incertidumbre de los parámetros de entrada (costos, tasa de descuento, vida útil total, entre otros) [6]. El análisis determinístico incluye el uso de parámetros de entrada fijos, que generan resultados con valores fijos. El valor medio de los parámetros es estimado con base en evidencia histórica o en la experiencia del analista. En este tipo de análisis se requiere un estudio de sensibilidad, en el que se varía uno de los parámetros de entrada, y se mantienen el resto de valores constante, esto permite evaluar la validez de las asunciones. Entre las desventajas del método determinísticos se encuentra la imposibilidad de determinar el nivel de incertidumbre de los resultados y en consecuencia no se pueden hacer análisis de riesgo.

Por otra parte, el análisis estocástico permite la evaluación de parámetros de entrada definidos por una distribución de probabilidad obtenida basada en datos reales [6]. El método estocástico incluye la descripción probabilística de variables aleatorias y técnicas de simulación por computadora, como la simulación Monte Carlo [8]. Este método es más robusto y realista que el análisis determinístico.

1.2.2 Metodología para el análisis del ciclo de vida

Según la FHWA, la metodología para realizar un análisis del CCV consiste en cinco pasos principales:

1. Establecimiento de las alternativas
2. Determinar la frecuencia de las actividades
3. Estimar los costos
4. Calcular los costos del ciclo de vida
5. Analizar los resultados

El primer paso consiste en establecer las diferentes alternativas que incluyen la expectativa de la vida útil, tratamientos de mantenimiento periódicos y las actividades rehabilitación estimadas para cada alternativa. Generalmente estas alternativas son determinadas con base en la experiencia de prácticas previas, investigación o políticas de las agencias [8]. Posteriormente se debe de determinar la frecuencia de aplicación de las actividades de mantenimiento y rehabilitación. La estimación de la frecuencia debe de ser basada en registros de desempeño de activos existente [8]. Esta información esta típicamente disponible en los buenos sistemas de gestión aunque generalmente no es fácil de extraer directamente.

El análisis del CCV toma en cuenta los costos que afectarían a la agencia y a los usuarios, como resultado de la construcción y las actividades de mantenimiento. Sin embargo, el análisis no requiere de la estimación de todos los costos asociados con cada alternativa, se requiere únicamente la estimación de los costos que demuestren diferencias entre las alternativas analizadas.

Adicionalmente, se debe de tomar en cuenta el valor del dinero en el tiempo, que corresponde al cuarto paso sugerido en la metodología. Para esto se utilizan métodos económicos que transforman el costo proyectado de cada actividad en valor presente, así los

todos los costos durante la vida útil de las alternativas pueden ser comparados de manera directa. Existen distintos indicadores económicos que se pueden utilizar en el análisis del CCV. Entre los más comunes se pueden nombrar: razón Beneficio/Costo (B/C), Tasa Interna de Retorno (TIR), Valor Presente Neto (VPN) y Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE).

La razón de B/C representa los beneficios descontados netos dividido entre los costos descontados netos. Esta metodología no es recomendada para análisis del CCV de pavimentos debido a la dificultad de determinar estimados confiables de costos y beneficios [5]. La TIR representa la tasa de descuento necesaria para que los beneficios y costos descontados sean iguales. Aunque este indicador no provee un criterio de decisión final, determina información útil, particularmente si el presupuesto es limitado o si la tasa de descuento utilizada no es confiable [5]. Es comúnmente utilizado en concesiones viales.

El VPN y el CAUE son utilizados para convertir los flujos de costos en un único valor económico, utilizando una tasa de descuento determinada. La literatura sugiere que el VPN es el indicador económico más utilizado en el análisis del CCV de pavimentos, ya que provee una base de comparación equitativa [8, 9]. El VPN puede ser estimado utilizando la Ecuación 1; en caso de que los periodos analizados no incluyan años enteros, se debe utilizar la ecuación de composición continua (Ecuación 2). El CAUE convierte los resultados del VPN en pagos anual equitativos durante el periodo de análisis, lo cual es particularmente útil para las agencias en las que el presupuesto se estima de manera anual. El CAUE puede ser estimado luego del cálculo del VPN utilizando la Ecuación 3.

$$VPN = Costo\ inicial + \sum_{k=1}^N Costo\ de\ rehabilitación_k \left[\frac{1}{(1+i)^{n_k}} \right] \quad (1)$$

Donde, i = tasa de descuento; n = número años considerados

$$VPN = Costo\ inicial + \sum_{k=1}^N Costo\ de\ rehabilitación_k \left[\frac{1}{\exp(i \cdot n_k)} \right] \quad (2)$$

$$CAUE = VPN \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (3)$$

Finalmente, los resultados del estudio económico son analizados. La decisión final toma en cuenta la alternativa que representa la opción económicamente más eficiente.

2 Caso de estudio

El presente estudio se ha basado en el desarrollo y aplicación del análisis del CCV de las principales técnicas de preservación de pavimentos utilizadas en Texas. Para esto, se contó con el acceso a distintas bases de datos e información de TxDOT. Sin embargo, para obtener la información requerida para el análisis, fue necesario el procesamiento y fusión de las distintas fuentes de información tales como: *Design and Construction Information System (DCIS)*, *Pavement Management Information System (PMIS)*, *Maintenance Management Information System (MMIS)*, *Site Manager (SM)* y *Compas*.

Las bases de datos de TxDOT que contienen información de proyectos de mantenimiento y rehabilitación pueden dividirse en dos grupos, el primero contiene información sobre proyectos bajo contrato (DCIS y SM), el segundo contiene datos de proyectos internos, realizados por TxDOT (MMIS y Compas) [10]. El primer grupo es la fuente primaria de los datos utilizados en este proyecto debido a que contiene información más precisa y detallada. El objetivo de procesar las bases de datos es obtener información sobre los proyectos de mantenimiento y rehabilitación de pavimentos tales como la localización, la vida efectiva, el costo, y otros detalles como la información del tránsito.

La base de datos final contiene información histórica de proyectos de mantenimiento y rehabilitación entre 1994 y 2015. Para el análisis únicamente se utilizó información de proyectos de mantenimiento preventivo, que corresponde a un total de 14372 proyectos que

incluyen tres diferentes tipos de tratamientos: tratamientos superficiales, micro-aglomerados y sobrecapas delgadas de mezcla asfáltica en caliente. Los proyectos de mantenimiento preventivo analizados únicamente incluyen daño no estructural en el pavimento.

2.1 Vida útil efectiva

La vida útil de un tratamiento es un dato fundamental para el análisis del CCV, por lo tanto, la obtención de esta información de la base de datos es crítica. En esta sección se detalla el proceso realizado para obtener los datos de la vida útil de los tratamientos en estudio.

2.1.1 Procesamiento de datos

De las bases de datos se extrajo información de los proyectos de mantenimiento preventivo, que generalmente utilizan un número de identificación conocido como Sección de Control de Trabajo o *Control Section Job* (CSJ). Este número está compuesto por nueve dígitos, los seis primeros se refieren a la sección de control (localización del segmento de carretera) y los últimos tres números son identificadores del trabajo realizado. El día en el que el tratamiento fue colocado en una determinada sección y abierto al tráfico fue seleccionado como la fecha inicial, esta información fue extraída de SM. Además, el día en el que otro tratamiento fue colocado y abierto al tránsito en la misma sección corresponde al fin de la “vida útil” del tratamiento o “vida efectiva”. EL concepto de vida efectiva fue introducido en este trabajo para capturar secciones que son reparadas antes del fin de su vida útil. Para determinar este dato con mejor precisión, la fecha de finalización fue revisada y corregida detalladamente utilizando la base de datos MMIS.

Adicionalmente, estas fechas se corroboraron verificando que correspondieran al mejoramiento esperado según la condición del pavimento. Para esto, las curvas de desempeño del pavimento se inspeccionaron visualmente cuando las fechas se encontraban con dos años de diferencia del mejoramiento observado. Esta información se obtuvo del PMIS, que presenta datos de desempeño de las secciones en términos de la Puntuación de Condición o *Condition Score* (CS). Este indicador combina la calidad de viaje y la severidad de los daños en la estructura en un índice con escala de 0 a 100, donde 100 indica la mejor condición. Una superficie se considera en buenas condiciones si presenta un CS mayor a 70.

La vida de servicio o vida útil de un pavimento depende significativamente del volumen y las cargas vehiculares a las que esté sometida la estructura. Por lo tanto, la información de tránsito y tipo de carretera también se extrajo de las bases de datos. La información procesada posee datos sobre el volumen de tránsito, las cargas vehiculares y tipo de carretera, tomada principalmente de PMIS. El procesamiento de esta información consistió en obtener el promedio de los datos de las secciones del PMIS localizadas dentro de la sección de análisis.

El volumen de tránsito está representado por el Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA). El TPDA está definido como el volumen total de tránsito en un segmento de carretera durante un año, dividido entre 365 días [11]. Esta información puede ser obtenida de conteos vehiculares, que deben de ser ajustados para tomar en cuenta variaciones diarias (fines de semana y días entre semana) y estacionarias (por ejemplo, verano o invierno). Por otra parte, las cargas vehiculares están representadas mediante la Carga de Eje Equivalente o ESAL, que corresponde a un concepto desarrollado en el Ensayo de AASHO para establecer una relación que compara los efectos de diferentes cargas aplicadas a diferentes ejes. El eje de referencia corresponde a una carga de 80 kN (18000 lb) en un eje simple [11].

Los tipos de carretera analizados corresponden a las designaciones utilizadas en Texas. TxDOT asigna diferentes designaciones a las carreteras dependiendo de su propósito, requerimientos de diseño y estándares de construcción. Para el presente análisis se utilizaron cuatro categorías jerárquicas. Las rutas primarias que incluyen las autopistas Interestatales (*Interstate Highways*), y las autopistas Nacionales (*US Highways*) que forman parte del sistema de autopistas que atraviesan más de un estado. Las autopistas Estatales (*State Highways*) que conforman la red de conexiones internas mantenidas por el Estado, que pueden pertenecer a

rutas primarias y secundarias. Y las rutas de carreteras Rurales (*Farm to Market Highways*) que corresponden a las rutas secundarias que conectan las zonas rurales con los centros de población.

2.1.2 Análisis de sobrevivencia

El análisis de los datos arrojó una alta variabilidad en la vida efectiva, por lo que el enfoque más realista para el análisis es el CCV estocástico, utilizando la distribución de la vida efectiva en lugar del valor medio. Para esto, se utilizó un análisis similar al realizado por Serigos et al. [10]. Este estudio realizó un análisis de la sobrevivencia de los tratamientos de mantenimiento preventivo, lo que permite incluir los casos en los que el tratamiento se encontraba aún en uso, y su vida útil aún no llega a su fin. Incluir esta información en el análisis de la vida efectiva permite una estimación más robusta. Esto se realizó mediante la consideración de los datos censurados y la aplicación de análisis de supervivencia o *survival analysis*.

Las curvas de supervivencia de los tres tratamientos en estudio se estimaron conjuntamente para evitar el impacto de variables "confusas" durante la comparación entre ellos. Además, se tomaron en cuenta otros factores que pudieran influenciar la duración del tratamiento. Para esto, se desarrolló un Modelo de Vida Útil Acelerado (MVUA) adoptando una distribución de Weibull. El modelo de sobrevivencia tomó como base el tratamiento superficial y tres covariables: el volumen (en 10^3 ESAL), la carga vehicular (TPDA) y el tipo de carretera. Este MVUA fue estimado empleando el paquete SURVIVAL del lenguaje de programación R. Utilizando este modelo, se obtuvieron los parámetros de escala (a) y de forma (b) que permiten estimar la densidad de probabilidad de la vida útil efectiva de cada tratamiento en estudio, usando la distribución Weibull mostrada en la Ecuación (4).

$$f(x|a, b) = \frac{b}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} e^{-(x/a)^b} \quad (4)$$

Donde, $a > 0$ es el parámetro escala y $b > 0$ es el parámetro de forma

Adicionalmente, se estimaron distribuciones de probabilidad para cada tratamiento según el volumen de tránsito, la carga vehicular y el tipo de carretera. Esto se realizó con el fin de análisis los posibles efectos de estas variables en el CCV. En el caso del volumen de tránsito, se tomaron tres distintos rangos de TPDA, menos de 5000, entre 5000 y 10000 y más de 10000 vehículos. Además, se definieron tres categorías de carga vehicular. La primera corresponde a cargas menores de un millón de ESAL, la segunda a cargas entre un millón y diez millones, y la tercera a cargas superiores de diez millones de ESAL. También se segregó por cada uno de los cuatro tipos de carreteras.

2.2 Costos

Los costos de cada tratamiento fueron obtenidos con base en el costo final de cada proyecto, estimado una vez finalizada la colocación del tratamiento, los datos fueron adquiridos del PMIS y SM. Además, de la información procesada se obtuvo la longitud total de la sección y la cantidad de carriles. Con esta información fue posible estimar el costo por cada milla por carril. Este costo fue transformado a dólares del año 2016 utilizando el índice de inflación sugerido por la Oficina de Estadística de los Estados Unidos [12].

Las variaciones en los costos son consecuencia de los cambios en los costos de los materiales, ubicación de los proyectos, mano de obra utilizada, y duración del proyecto, entre otras variables. Con el fin de tomar estas variables en cuenta para el análisis de CCV de los tratamientos, el costo también fue modelado estocásticamente. Para esto, se seleccionó la distribución logarítmica normal, estimada utilizando los costos obtenidos de las bases de datos. Una distribución normal logarítmica evita la simulación de costos negativos, y representa de

una manera apropiada los valores extremos encontrados en los datos analizados, por lo que se consideró que este tipo de distribución es la más acertada para modelar los costos.

La distribución logarítmica normal, mostrada en la Ecuación 5, requiere de los parámetros de localización (μ) y de escala (σ). Estos parámetros fueron obtenidos empleando la Ecuación 6 y 7, respectivamente, utilizando la media y la varianza estimada de la base de datos para cada tratamiento en estudio.

$$f(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

Donde, $x \geq 0$, μ es el parámetro de localización y σ es el parámetro de escala

$$\mu = \log(m^2 / \sqrt{v} + m^2) \quad (6)$$

Donde, m es la media y v es la varianza de la distribución normal logarítmica

$$\sigma = \sqrt{\log(v/m^2 + 1)} \quad (7)$$

Además, al igual que con la vida útil efectiva, se estimaron distribuciones de probabilidad separadas para cada rango definido de volumen de tránsito, carga vehicula y tipo de carretera.

3 Análisis del costo del ciclo de vida

Para el análisis del costo del ciclo de vida se utilizó el método estocástico, debido a que este procedimiento permite tomar en cuenta la incertidumbre de los datos de entrada y medir la variabilidad en los resultados, lo cual puede ser utilizado en análisis de confiabilidad.

3.1 Metodología

El periodo de análisis establecido fue de 25 años. Durante este periodo se asumió la colocación sucesiva del mismo tipo tratamiento de mantenimiento preventivo sobre la superficie, actualmente esta práctica es común en muchas agencias de transporte. La Figura 1 ilustra la metodología empleada. El tiempo entre la aplicación de cada tratamiento está dado por la denominada vida efectiva, la cual posee una distribución Weibull. El costo total para el mantenimiento de la sección de carretera corresponde al costo de las aplicaciones del tratamiento durante el periodo de análisis, que posee una distribución normal logarítmica, menos el valor residual del tratamiento. El valor residual es definido como el valor monetario aproximado que el tratamiento tendría en un determinado momento de su vida útil, por lo que es calculado como el costo del tratamiento multiplicado por el porcentaje de vida útil remanente (Ecuación 8). Esto en caso de que, al momento de finalizar el periodo del análisis, el tratamiento aún no haya finalizado su vida útil efectiva.

$$V_{residual} = \frac{m_{res}}{m} (Costo) \quad (8)$$

Donde, m es la vida útil efectiva y m_{res} es la vida residual

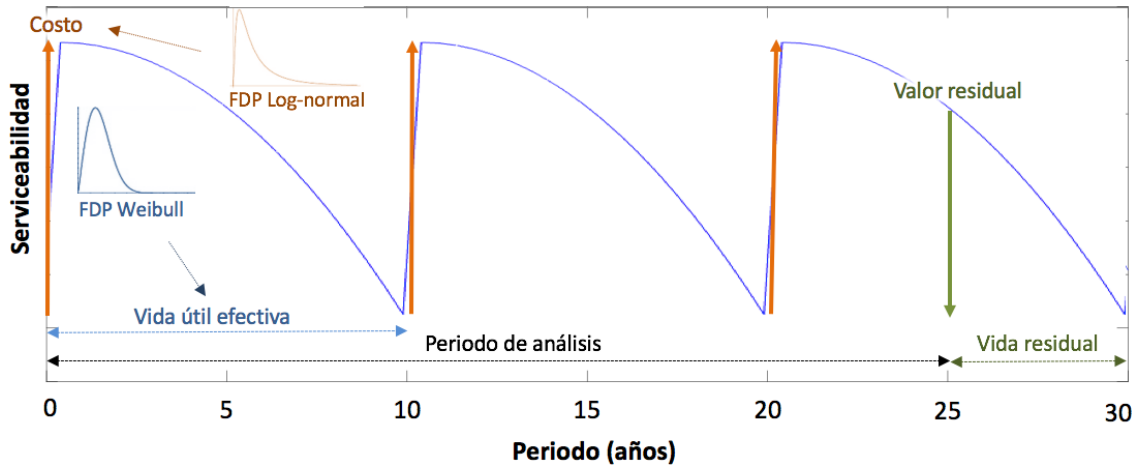


Figura 1. Metodología para el análisis estocástico del costo del ciclo de vida

Para el análisis se utilizó una simulación de Monte Carlo con 100000 repeticiones, que permite simular la vida útil efectiva y el costo, utilizando sus respectivas distribuciones de probabilidad. De esta manera se puede calcular un valor de VPN para cada una de las simulaciones realizadas. Por lo tanto, los resultados del VPN se pueden analizar tomando en cuenta la variabilidad. Para esto se utilizó el programa MATLAB. La tasa de interés utilizada fue de 4%, debido a que esta es la tasa de interés utilizada en la estimación del VPN en proyectos de carretera realizados en Texas [13].

El primer paso en el análisis fue la simulación de la vida efectiva. Para esto se utilizó MATLAB para generar 100000 valores que siguen la distribución Weibull, utilizando los parámetros de escala (a) y de forma (b) estimados previamente para cada tratamiento. Igualmente, se simuló el costo generando 100000 valores que siguen la distribución normal logarítmica, para esto se utilizaron los parámetros de localización (μ) y de escala (σ) para cada tratamiento. Esto se realizó de igual manera con las distribuciones obtenidas para cada rango de volumen de tránsito, carga vehicular y tipo de carretera.

Posteriormente se estimó el costo del ciclo de vida mediante el VPN. Debido a que se obtuvieron las distribuciones de la vida efectiva y del costo, también se obtuvo la distribución del VPN. El VPN se estimó para cada una de las 100000 simulaciones realizadas previamente implementando la Ecuación 9 en MATLAB.

$$VPN_{jk} = C_{jk} + \sum_{x=1}^{z_1-1} \frac{C_{jk}}{\exp[i \cdot (x \cdot m_{jk})]} - \frac{V_{res}}{\exp(25 \cdot i)} \quad (9)$$

Donde,

j = tipo de tratamiento (sobrecapa delgada, micro-aglomerado o tratamiento superficial)

k = iteraciones de Monte Carlo (de 1 a 100 000)

VPN_{jk} = Valor Presente Neto del tratamiento j en la iteración k

C_{jk} = costo en el año 2016 del tratamiento j en la iteración k

m_{jk} = vida útil efectiva para el tratamiento j en la iteración k

$z = 25/m_{jk}$ (aplicaciones del tratamiento j durante el periodo de análisis de 25 años)

$z_1 =$ redondeo al número entero inferior $\{z\}$

$V_{res} = z - z_1$ (vida residual)

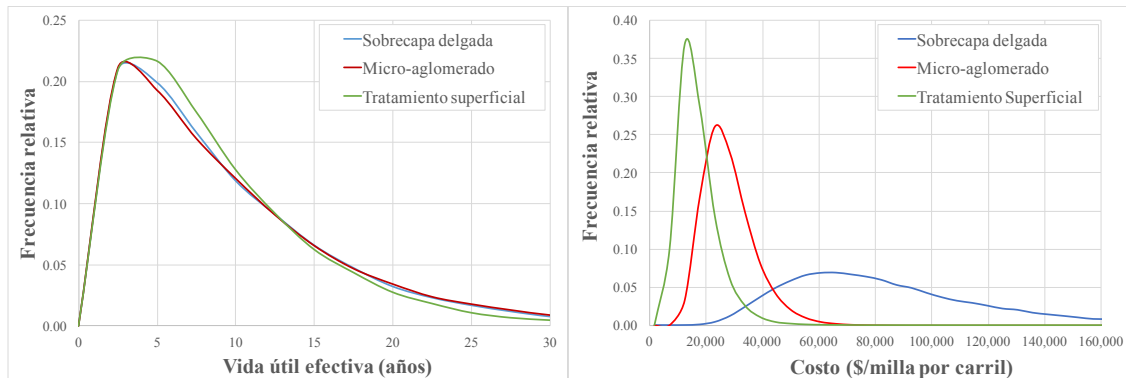
$i = 0.04$ (tasa de interés)

3.2 Resultados obtenidos

En esta sección se presentan y discuten los resultados obtenidos.

3.2.1 Vida útil efectiva y costo

Los tres tratamientos presentan una distribución de vida efectiva similar con un promedio de 7.6 años para los tratamientos superficiales, 8.6 años para las sobrecapas delgadas y 8.4 años para los micro-aglomerados. En cuanto a los costos, las sobrecapas delgadas presentaron un costo medio significativamente mayor, con una mayor variabilidad. El costo obtenido presenta un promedio por milla por carril de aproximadamente \$14500 para los tratamientos superficiales, \$25600 para los micro-aglomerados y \$83400 para las sobrecapas delgadas. Mediante la simulación realizada para la vida efectiva y el costo, se obtuvieron las distribuciones de probabilidad cuyos resultados se ilustran en la Figura 2.



3.2.2 Costo del ciclo de vida

Los resultados obtenidos del análisis del CCV se muestran en la Figura 3. La distribución de probabilidad del VPN, que representa el CCV, muestra una marcada diferencia entre el costo de los tratamientos. Para describir los resultados de la distribución del VPN se utiliza la mediana, debido que este valor es menos susceptible a valores extremos, en comparación con el valor promedio. Los tratamientos superficiales muestran el menor costo con una mediana de \$39000 y presentan la menor variabilidad en los resultados. Los micro-aglomerados presentan un costo 70% mayor a los tratamientos superficiales con una mediana de \$66000. Por otro lado, las sobrecapas delgadas presenta el mayor costo con una mediana aproximada de \$190000 y una alta variabilidad. Esto representa un costo cinco veces mayor que los tratamientos superficiales y tres veces mayor que los micro-aglomerados, aproximadamente.

A pesar de que los tratamientos superficiales presentan el CCV menor, generalmente la selección de los tratamientos depende de otros factores, incluyendo la ubicación geográfica, el clima, las zonas urbanas o rurales, entre otras. La ubicación en la carretera también es un factor importante, debido a que hay segmentos que son más propensos a ser sometidos a mayores ciclos de aceleración y desaceleración, como las intersecciones y las paradas de autobuses. En estos casos las sobrecapas delgadas se desempeñan mejor que los otros tratamientos analizados. Por otro lado, los micro-aglomerados son comúnmente utilizados cuando se necesita incrementar la fricción de la carretera. Adicionalmente, otros factores como la disponibilidad del material del tratamiento y de la mano de obra también influyen en la decisión, así como los volúmenes y cargas vehiculares.

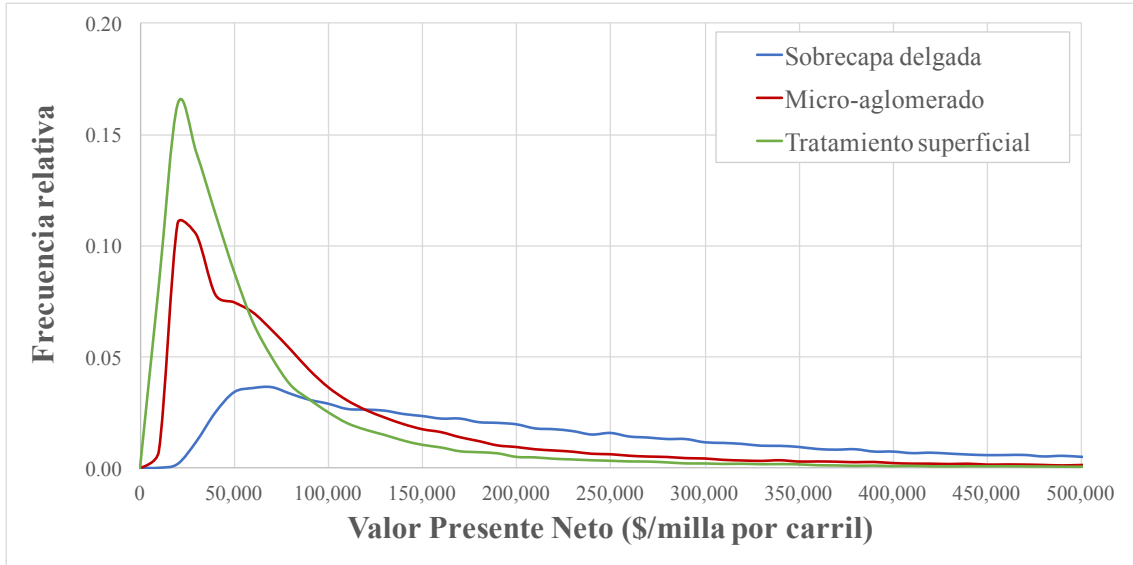


Figura 3. Costo del ciclo de vida para cada tratamiento

3.3 Efecto del volumen y cargas del tránsito y tipo de carretera

El análisis del CCV se realizó para los tres tratamientos en estudio, y también se tomó en cuenta el efecto del volumen del tráfico, las cargas vehiculares y el tipo de carretera. Los resultados de la mediana del CCV según el volumen vehicular (TPDA) se muestran en la Figura 4a. Se puede observar un CCV significativamente superior para la segunda categoría con respecto a la primera. Sin embargo, la tercera categoría presenta valores muy similares a la segunda, ligeramente inferiores. Lo que sugiere que el costo de los tratamientos no varía considerablemente para valores de TPDA superiores a 5000 vehículos.

El efecto de las cargas vehiculares se midió utilizando la Carga de Eje Equivalente o ESAL a la que está sometido la carretera. Los resultados se presentan en la Figura 4b. En este caso, el efecto de la carga vehicular se ve reflejado en el costo del ciclo de vida del tratamiento. Para mayores cargas vehiculares, el CCV es mayor. Para cargas menores al millón de ESAL, la diferencia entre el costo de los tratamientos superficiales y los micro-aglomerados es significativa. Sin embargo, cuando las cargas son mayores a 10 millones de ESAL, el costo tiende a igualarse.

Adicionalmente, se analizó el efecto del tipo de carretera utilizando los cuatro tipos definidos anteriormente. En este caso en particular se observó una alta variabilidad, principalmente en el costo de las sobrecapas delgadas, como se puede observar en la Figura 4c. Las carreteras rurales presentaron el menor CCV, seguido por las autopistas estatales. Por otro lado, las rutas nacionales e interestatales, correspondiente a las principales rutas del país, presentaron el mayor CCV.

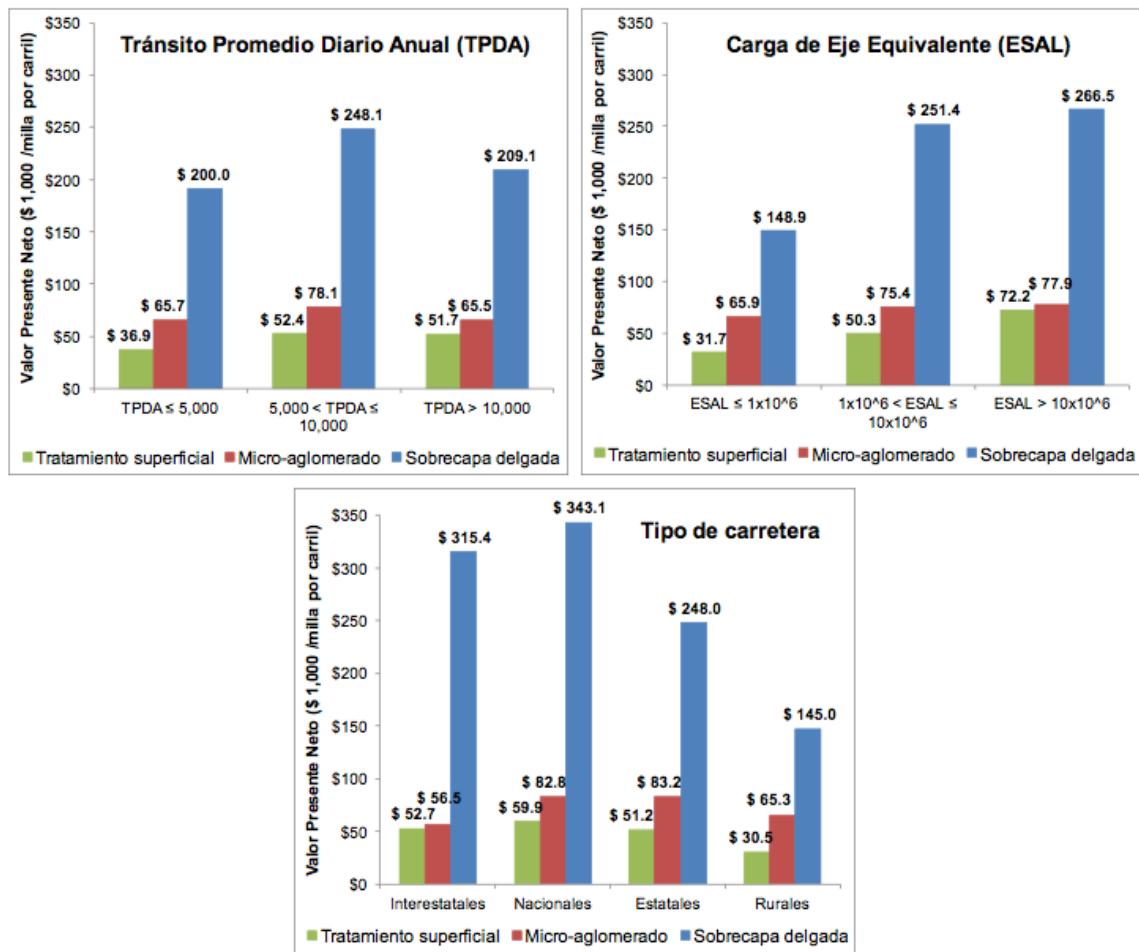


Figura 4. Efecto del a) Tráfico Promedio Diario, b) Carga de Eje Equivalente, c) tipo de carretera

3.4 Probabilidades de costo de los tratamientos de mantenimiento preventivo

La probabilidad de que un tratamiento sea más caro que otro es un indicador importante que facilita la selección del tipo de tratamiento a utilizar, principalmente en caso de no tener información disponible para la toma de decisiones. La probabilidad se estimó con base en las 100000 simulación realizadas utilizando el método de Monte Carlo. Los resultados, presentados en la Tabla 1, muestran que los tratamientos superficiales tienen un 70% de probabilidad de tener un CCV menor que los micro-aglomerados, y un 85 % de probabilidad en comparación con las sobrecapas delgadas. Por otra parte, los micro-aglomerados presentaron un 75% de probabilidad de ser económicamente más eficientes que las sobrecapas delgadas.

Tabla 1. Probabilidad del tratamiento como la opción más económicamente eficiente

| Tratamiento 1 | Tratamiento 2 | P [Tratamiento 1 < Tratamiento 2] |
|-------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Tratamiento superficial | Micro-aglomerado | 70% |
| Tratamiento superficial | Sobrecapa delgada | 85% |
| Micro-aglomerado | Sobrecapa delgada | 75% |

4 Conclusiones y recomendaciones

Mediante este estudio se desarrolló un marco metodológico para el análisis del CCV con el fin de evaluar los tres principales tratamientos de mantenimiento preventivo utilizado en Texas: tratamientos superficiales, micro-aglomerados y sobrecapas delgadas. Para esto se utilizó un caso de estudio basado en más de 14000 proyectos de mantenimiento desarrollados entre 1994 y 2015. Adicionalmente, la información sobre el volumen y las cargas vehiculares se tomó en cuenta con el fin de observar la variación del CCV. Los resultados de este estudio están basados en datos reales de proyectos ejecutados, por lo tanto, brindan una perspectiva más acertada sobre la vida útil y los costos de los tratamientos de mantenimiento preventivo, así como del costo del ciclo de vida. Si bien los valores presentados en este artículo están basados en datos de Texas, la metodología se puede aplicar en cualquier país o agencia. Entre las conclusiones más importantes se encuentran:

- La vida efectiva promedio de los diferentes tratamientos analizados es similar.
- El costo de los tratamientos superficiales y los micro-aglomerados es significativamente menor que el costo de las sobrecapas delgadas, y presentan una menor variación.
- En general, los tratamientos superficiales presentaron el costo de vida útil económicamente más eficiente y las sobrecapas delgadas presentaron el costo menos eficiente, con un valor cinco veces superior a los tratamientos superficiales y tres veces mayor a los micro-aglomerados, aproximadamente.
- El volumen vehicular, representado por medio del TPDA, no parece presentar un efecto significativo entre el CCV de los distintos tratamientos.
- La carga vehicular tiene un efecto importante en la diferencia del CCV de los tratamientos superficiales y los micro-aglomerados. Para cargas mayores, el costo de los tratamientos tiende a ser similar.
- El CCV presentó el mayor impacto cuando se tomó en cuenta el tipo de carretera, las carreteras primarias presentan un costo significativamente mayor.

Para futuros estudios se recomienda la inclusión de variables que podrían tener un efecto importante en el CCV de los tratamientos, y que no fueron tomadas en cuenta en este estudio. Por ejemplo, la información climática, el tipo de materiales utilizados, la condición previa del pavimento, las prácticas históricas, entre otros. Adicionalmente, se recomienda una investigación sobre el beneficio de los tratamientos superficiales en proyectos de rehabilitación donde existe daño estructural, esto debido a que los tratamientos de mantenimiento preventivo analizados en este estudio, únicamente toman en cuenta daños no estructurales en el pavimento.

5 Referencias

- [1] American Society of Civil Engineers (ASCE). (2013). America's Structures Score. 2013 Infrastructure Report Card. Recuperado de: <http://www.infrastructurereportcard.org/>
- [2] Jeong, D.G.S., Pour, S. A. (2012). Realistic Life-Cycle Cost Analysis with Typical Sequential Patterns of Pavement Treatment Through Association Analysis. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2304, Transportation Research Board, of the National Academy, Washington, D.C., pp. 12 104–111.
- [3] Gieger, D.R. (2005) Memorandum: Pavement Preservation Definitions. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration: Pavements. Recuperado de: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/preservation/091205.cfm>
- [4] Peshkin, D. G., Hoerner T. E., K. A. Zimmerman. (2004). NCHRP Report 523: Optimal Timing of Pavement Preventative Maintenance Treatment Applications. Transportation 25 Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- [5] Chang, J.R., Chen D.H. and C.T. Hung. (2008). Selecting Preventing Maintenance Treatments in Texas: Using the Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution for Specific Pavement Study 3-Sites. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1933, Transportation Research Board, of the National Academy, Washington, D.C., pp. 62–71.

- [6] The Transportation Equity Act for the 21st Century. (1998). Signed May 29, 1998.
- [7] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Asset Management. (2002). Life-Cycle Cost Analysis Primer.
- [8] Walls, J., y M.R. Smith. (1998). Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design - Interim Technical Bulletin. Publication No. FHWA-SA-98-079. FHWA, U.S. Department of Transportation, Pavement Division.
- [9] Beg M.A., Zhang Z., y W.R. Hudson. (1998). A Rational Pavement Type Selection Procedure. Report No: FHWA/TX-04/0-1734-S. Center for Transportation Research, Austin, TX. 1998.
- [10] Serigos, P., Smit, A., and Prozzi, J. Performance of Preventive Maintenance Treatments for Flexible Pavements in Texas. TxDOT Technical Report No: 0-6878-2. Center for Transportation Research, UT Austin, 2017.
- [11] Huang, Y.H. (2004) Pavement Analysis and Design. Pearson Education, Inc., New Jersey.
- [12] Bureau of Labor Statistics. U.S. Department of Labor. Commodity Data Database. Recuperado de: <https://www.bls.gov/data/>
- [13] Wimsatt, A., Chang, C., Krugler, P., Scullion, T., Freeman, T., and Valdovinos, M. (2005). Considerations for Rigid vs. Flexible Pavement Designs When Allowed as Alternate Bids. Technical Report No: FHWA/TX-09/0-6085-1. Texas Transportation Institute, College Station, TX.