

# Implementación de un modelo climático a un sistema probabilístico de diseño de pavimentación flexibles empírico-mecanicista

**José Omar Melchor,**  
jose.melchor@lasfalto.com.mx  
**Carlos Chávez,**  
cachavez@umich.mx  
**Luis Alberto Morales,**  
lamorales@conacyt.mx

**Jorge Alarcón,**  
jorge.alarcon.ibarra@hotmail.com  
**Ignacio Cremades,**  
cremades@surfax.com.mx

En México es necesario mejorar la calidad y el diseño de los pavimentos flexibles, debido a los constantes casos de baja calidad que se han presentado en las últimas décadas. Uno de los principales problemas es como incorporar modelos climáticos de temperatura y de contenido de agua considerando la caracterización de condiciones in-situ a partir de un conjunto de datos imprecisos. En este artículo, se presenta la implementación de modelos climáticos que permiten analizar el desempeño de una estructura de pavimento flexible ante las solicitaciones del tránsito, propiedades de los materiales y el efecto del medio ambiente. Se generó un ajuste de funciones de distribución de probabilidad para las condiciones in-situ, permitiendo la observación de distintos comportamientos presentes durante la vida útil del pavimento. Para el análisis de esfuerzos y deformaciones de cada capa se empleó el método de Odemark. La vida útil del pavimento, afectada por deformaciones permanentes y agrietamiento por fatiga de la carpeta asfáltica, fue determinada utilizando las funciones de transferencia de desempeño deducidas del método de diseño de pavimentos del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y funciones de transferencia generales como las utilizadas por el TRRL del Reino Unido para 85% de confiabilidad. El incremento del daño producido en la estructura del pavimento en cada iteración de carga es acumulado a través de la ley de Miner. Posteriormente, se escala a un valor crítico de uno para estimar la vida útil del pavimento. Para mostrar la viabilidad de estos modelos se desarrolló un programa computacional basado en el enfoque empírico-mecanicista para el diseño de pavimentos asfálticos empleando una simulación basada en el método de Monte Carlo. Con ello, se obtuvo una herramienta que contribuye a disminuir el grado de incertidumbre generada en el diseño de pavimentos flexibles.

**Palabras Clave:** Pavimentos Flexibles, Análisis Probabilístico y Modelo Climático.

In Mexico, it is necessary to improve the quality and design of flexible pavements due to constant cases of low quality that have been presented in recent decades. One of the main problems is how to incorporate a climatic model of temperature and a content water model by considering an in-situ conditions characterization from an imprecise data set. In this research, implementation of climatic models is presented, by allowing to analyze the performance of a flexible pavement structure through transit requirements, material properties and the effect of the environment. An adjustment of probability distribution functions was generated to in-situ conditions, allowing to observe several behaviors across the useful life of the pavement. The Odemark method was used to carry out the stresses and deformations analysis for each layer. Pavement life, affected by structural rutting and fatigue cracking, was determined

# Implementación de un modelo climático a un sistema probabilístico de diseño de pavimentación flexibles empírico-mecanicista

by transfer functions equations deduced from the design method proposed by “Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México” (UNAM, México), and the general transfer functions, proposed and used by the TRRL of the United Kingdom with a 85% of reliability. The incremental damage, produced in the pavement structure for each load of the iteration, is accumulated through the Miner’s law. Then, it is scaled to a critical value of one to estimate the useful life of the pavement. In order to show the viability of these models, a computational program based on the empirical-mechanistic approach to design asphalt pavements was developed, by using a simulation based on the Monte Carlo method. We developed a tool that contributes to decrease the uncertainty degree generated in the design of flexible pavements.

**Keywords:** Flexible Pavements, Probabilistic Analysis and Climatic Models.

## 1. Introducción

El crecimiento en el país trae consigo un aumento en el comercio, el cual a su vez incrementa el transporte terrestre, es decir un incremento en el Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA).

Uno de los retos que presenta el aumento en el tránsito es garantizar la calidad de la infraestructura vial, lo que conlleva a que el estudio de los pavimentos flexibles sea una necesidad para la infraestructura de los países que buscan un equilibrio entre el costo de inversión y la durabilidad. De acuerdo con esto, se requiere de una caracterización adecuada de las condiciones in-situ tales como el tránsito, propiedades de los materiales y el medio ambiente, así como la implementación de modelos climáticos que permitan determinar el efecto que los fenómenos meteorológicos producen en los materiales que componen las distintas capas de la estructura del pavimento; ya que dichos parámetros son fundamentales para concebir estructuras de pavimentos que ofrezcan altos desempeños en términos de durabilidad.

Con el avance tecnológico el país ha tenido acceso a las diferentes metodologías de diseño siendo las metodologías empírico-mecanicistas las más utilizadas. Este tipo de metodologías a diferencia de las empíricas, toman en cuenta como los estados de esfuerzos y deformaciones presentes en las interfaces de las capas que componen la estructura del pavimento, influyen directamente en el comportamiento de este. Una de las principales desventajas de estas metodologías es que en la mayoría de los casos los programas computacionales disponibles no toman en cuenta el efecto del medio ambiente sobre las propiedades mecánicas de los materiales [4, 5, 7, 19 & 20]. Además, no toman en cuenta el efecto que puede tener la acumulación de la deformación en las capas de base y subbase no

tratadas [14].

Los diseños basados en dichas metodologías empírico-mecanicistas [1, 4, 5, 7, 8, 11, 13, 17 & 18] presentan problemas para la obtención de información confiable de las condiciones in-situ, tanto para proyectos nuevos como para estructuras en servicio. Esto se debe a que los datos presentan imprecisiones que no son ajustadas debido a errores durante su captura o en las pruebas de laboratorio; en otras ocasiones existen datos faltantes, lo que hace que los parámetros de entrada utilizados para calibrar adecuadamente los modelos de diseño presenten errores. Esto ocasiona que los diseños operen con datos imprecisos y presenten errores al calcular la vida útil para el diseño del pavimento flexible. Es importante resaltar que los datos no están uniformemente distribuidos, por lo que se requiere un análisis estadístico y probabilístico para su ajuste. Es decir, se requiere de una selección y aplicación de técnicas que permitan un pretratamiento estadístico para organizar y ordenar la información, identificando los datos atípicos para su eliminación o en su caso la reconstrucción de series de datos para datos faltantes. Aunado a esto, los métodos de diseño desarrollados en México hasta el momento no cuentan con una herramienta computacional que permita el diseño basado en métodos probabilísticos que incluyan el análisis de las condiciones medioambientales como son la temperatura y el contenido de agua.

Por lo tanto, en este artículo se requirió de la incorporación de métodos probabilísticos y modelos climáticos a las metodologías empírico-mecanicistas [19 & 20]. Además, se describe la inclusión de modelos climáticos en una herramienta computacional de simulación basada en el método de Monte Carlo, que facilita al proyectista el diseño de pavimentos flexibles. El Sistema Probabilístico de Diseño de Pavimentos (SIP-PAV), permite identificar y analizar la variabilidad de los parámetros de

entrada, realizando un preprocesamiento estadístico y eliminando datos atípicos presentes en las variables analizadas. Además, permite realizar un proceso analítico basado en la identificación, cuantificación y acumulación de daño del pavimento bajo sus diferentes condiciones in-situ; lo que genera una mayor confiabilidad de los diseños de pavimentos flexibles.

## 2. Antecedentes

Los métodos de diseño de pavimentos empírico-mecanicistas se pueden adoptar como un marco de referencia general. La parte analítica del método proporciona la respuesta estructural del pavimento ante la aplicación de carga, mientras que la parte empírica relaciona dicha respuesta con el desempeño del pavimento. Actualmente, existen dos tipos de modelos de predicción del desempeño: probabilístico y determinístico. En los métodos determinísticos, cada factor de diseño tiene un valor fijo que se basa en el factor de seguridad (FS) y que es propuesto por el diseñador. De acuerdo con esto, el diseñador asigna un valor de FS más elevado para los factores de diseño menos seguros o que tengan un mayor efecto al final del diseño. El empleo de estos métodos tradicionales basados en factores de seguridad, da como resultado diseños inadecuados, en términos de durabilidad [8]. En el enfoque probabilista, al FS se le asigna una media y una desviación estándar. En estos métodos, el FS asignado a cada variable de entrada y la sensibilidad del método son tomados con cuidado y con ello su confiabilidad puede ser evaluada. Hay que tomar en cuenta que la confiabilidad está definida como la probabilidad de que el pavimento desempeñe su función prevista durante la vida útil proyectada [8].

### 2.1 Métodos determinísticos

Existe un número de métodos determinísticos para el diseño de pavimentos flexibles, los cuales no consideran enfoques estocásticos o estadísticos, y por lo general este tipo de métodos son de aplicación rápida y sencilla [1, 4, 11, 13, 18 & 21]. Este tipo de métodos presentan varias limitaciones. Por una parte, uno de los principales inconvenientes es la caracterización del tránsito en términos de ejes sencillos equivalentes de 8.2 toneladas y no en términos de espectros de carga. Esto conlleva a no poder analizar de manera adecuada las cargas que transitan sobre la estructura del pavimento, y determinar

adecuadamente los daños que estas producen a dichas estructuras. Por otra parte, no analizan el efecto que las condiciones climáticas producen sobre las propiedades de los materiales ya que no emplean modelos climáticos. Otra limitante que aparece en este tipo de métodos es que no todos realizan un análisis de esfuerzos y deformaciones, sino que proponen coeficientes de resistencia estructural para obtener los espesores equivalentes como el método de la UNAM [5]. Dichos métodos están basados en condiciones in-situ como: las propiedades de los materiales, tránsito vehicular o el clima, pero no toman en cuenta la interacción entre ellas. Estos métodos pueden considerar una o varias condiciones para el diseño de pavimentos flexibles, denominándose estos últimos como híbridos.

### 2.2 Métodos probabilísticos

Los modelos de comportamiento son modelos empíricos que se calibran con base en la información recabada en campo y que permiten predecir la condición de deterioro de los pavimentos evaluando el desempeño del mismo ante condiciones reales de: clima, desempeño de los materiales y tránsito vehicular. Por lo general, cuando se evalúa el desempeño del pavimento mediante un modelo de deterioro, el resultado corresponde a un valor determinista. En este contexto, la manera adecuada de evaluar el desempeño de una estructura de pavimento es en términos de probabilidad de éxito. Esta queda definida como la probabilidad de que el número de repeticiones de carga realmente aplicadas sobre el pavimento, no excedan el número de repeticiones de carga que puede soportar un pavimento hasta alcanzar un nivel de serviciabilidad especificada.

En este tipo de métodos, el tránsito vehicular se caracteriza en términos de espectros de carga, tal como lo especifican Timm y Newcomb [19], en los análisis elásticos lineales empleando Waterways Experiment Station Layered Elastic Analysis (WESLEA). En el programa mencionado, la variabilidad de las propiedades de los materiales y de los espesores de las capas empleados pueden seleccionarse por el diseñador, con funciones de probabilidad tipo normal y log-normal; usando el método de simulación Monte Carlo. En la parte climática únicamente consideran el efecto que puede producir la temperatura sobre el desempeño estructural del pavimento. A pesar de analizar de manera probabilística el comportamiento estructural del pavimento, este tipo de métodos tienen el inconveniente de que

# Implementación de un modelo climático a un sistema probabilístico de diseño de pavimentación flexibles empírico-mecanicista

no implementan completamente la metodología empírico-mecanicista; pues aún no consideran modelos climáticos para el diseño de pavimentos como en otras metodologías [7, 14 & 19].

## 2.3 Efecto climático en los pavimentos

Un pavimento diseñado y construido adecuadamente será capaz de resistir las variaciones estacionales del clima. Factores como los cambios de temperatura, fuertes lluvias, drenajes deficientes y poco mantenimiento, provocan deterioros acelerados en la estructura del pavimento. De acuerdo con Villacorta et al. [9], para evitar la falla prematura de la estructura del pavimento, se deben considerar en el diseño todos los factores que afectan la variación de la temperatura del pavimento y el contenido de agua de las capas granulares. Para determinar dicha variación es necesario emplear modelos climáticos, los cuales, a partir de los datos ya procesados, de las propiedades de los materiales y el clima; ayudan a determinar los efectos que el medio ambiente produce sobre las propiedades de los materiales empleados y con ello estimar la variación a lo largo del año de dichas propiedades. Los modelos climáticos son sistemas de ecuaciones que intentan reproducir el comportamiento del mundo real, estos predicen la evolución del sistema que se estudia durante el tiempo.

Los fenómenos meteorológicos y el tránsito son los factores externos más influyentes en el desempeño estructural de un pavimento, y son los causantes del progresivo deterioro a lo largo de su vida útil [9].

## 3. Solución propuesta

En este artículo se propone mejorar la infraestructura vial del país, mediante el desarrollo y/o actualización de metodologías que ayuden a diseñar nuevos pavimentos flexibles. En la Figura 1 se muestra el esquema del modelo del SIP-PAV. Este es un modelo de simulación estocástico, debido a que el estado subsecuente del sistema se determina por acciones predecibles del proceso, como son los elementos aleatorios involucrados en la metodología descrita más adelante.

En la Figura 1 se puede apreciar la representación gráfica del modelo del sistema, cuyo proceso toma en cuenta los siguientes elementos:

- 1) El modelo analiza mediante la generación de *i*-iteraciones las diferentes propiedades y condiciones para un tramo de estructura de pavimento flexible:
  - a) Para cada iteración se generan de manera aleatoria condiciones de contenido de agua, temperatura y propiedades de los materiales para un instante de tiempo (*t*).

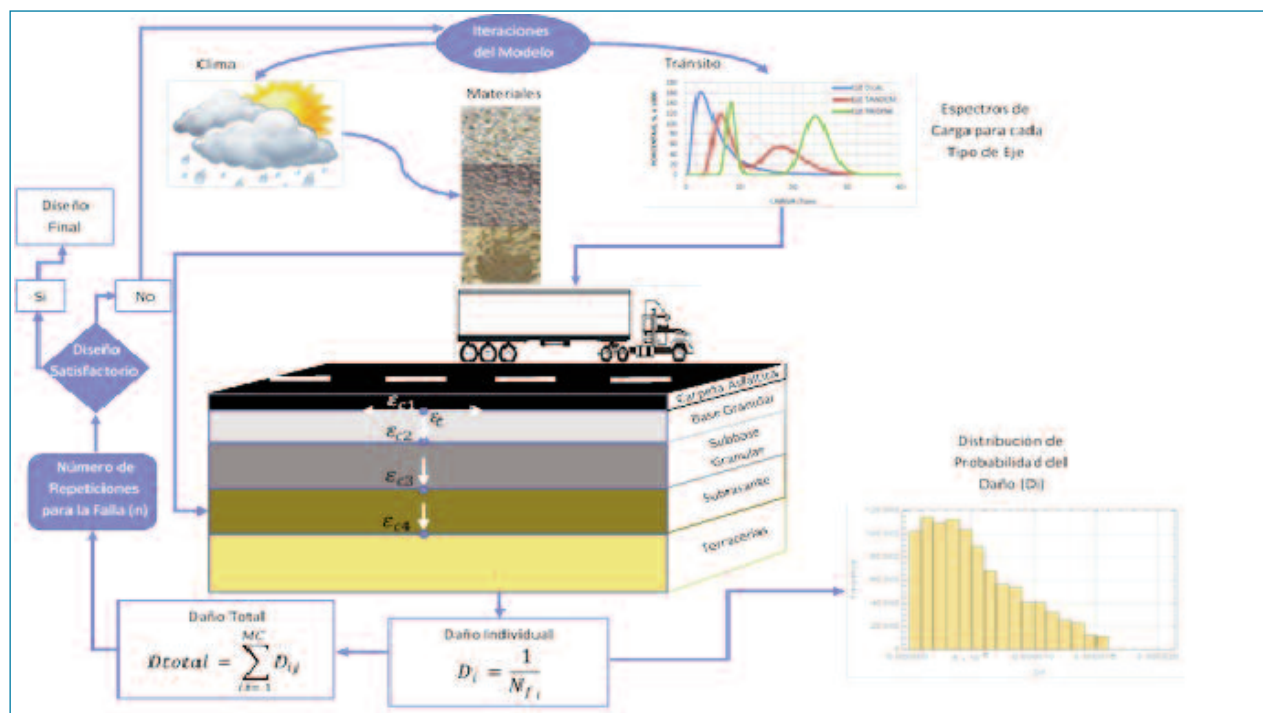


Figura 1. Modelo del sistema

i) Sobre la estructura del pavimento considerada se analiza el paso de  $j$  configuraciones de ejes correspondientes a los diferentes tipos de vehículos que circulan sobre dicho tramo, en donde se calcula:

(1) El daño individual ( $D_i$ ) que produce cada uno de los ejes, al transitar aleatoriamente sobre el tramo de pavimento considerado.

(2) Al finalizar el paso de los vehículos

(a) Se genera la distribución de probabilidad a partir de la acumulación del daño individual.

(b) Se determina la sumatoria ( $\sum_{ij=1}^{MC} D_{ij}$ ) del daño individual producido por cada tipo de eje (e.g. sencillo, tándem y tridem) que ha circulado sobre la estructura analizada.

b) Al finalizar las iteraciones se determina el daño acumulado global ( $D_{total}$ ) al evaluar las distintas configuraciones de los ejes (daño acumulado total individual sobre el tramo) y las distintas condiciones de contenido de agua, temperatura y propiedades de los materiales que han sido generadas.

2) Finalmente se determina el número de repeticiones de carga ( $n$ ) para presentar fallas por deformación permanente o por fatiga de la carpeta asfáltica, producidas por el paso de los diferentes tipos de ejes correspondientes a los vehículos que transitan sobre la estructura del pavimento, escalando el daño total ( $D_{total}$ ) a un valor crítico de 1

$$\left( n = \frac{1.0 * Iteraciones}{D_{total}} \right)$$

### 3.1 Aplicación de modelos climáticos

En esta sección se describen los modelos climáticos usados para la influencia de la temperatura y el contenido de agua en las propiedades de las capas del pavimento.

#### 3.1.1 Modelo climático para temperatura

La carpeta asfáltica es una mezcla elaborada con agregado pétreo y un material asfáltico, sus propiedades mecánicas

están en función de las propiedades de cada componente de la mezcla. El desempeño del módulo dinámico (MD) está en función de la temperatura, razón de carga, edad del pavimento, características de la mezcla como contenido de asfalto, su viscosidad, granulometría y vacíos. Witczak desarrolló un método, el cual toma en cuenta la composición de la mezcla asfáltica y que vamos a utilizar para determinar el módulo dinámico [6]. La ecuación de Witczak se muestra a continuación:

En donde  $E$  = Módulo Dinámico de la Mezcla Asfáltica,  $n$  = Viscosidad del Asfalto,  $f$  = Frecuencia de Aplicación de Carga,  $V_a$  = Porcentaje en Volumen de Aire,  $V_{bff}$  = Porcentaje en Volumen Efectivo de Asfalto,  $P_{34}$  = Porcentaje Retenido en la Malla  $\frac{3}{4}$ ,  $P_{38}$  = Porcentaje Retenido en la Malla  $\frac{3}{8}$ ,  $P_4$  = Porcentaje Retenido en la Malla N.4,  $P_{200}$  = Porcentaje Retenido en la Malla N. 200.

De una base de datos climáticos se obtienen los valores correspondientes para la temperatura. Para la temperatura máxima, se toma el promedio de los 7 días consecutivos más calurosos del año. Para la temperatura baja, se considera el valor mínimo registrado en la estación climática de acuerdo con lo que estipula Mohseni [12].

Para la estimación del tipo de asfalto por grado PG, se aplicó la ecuación (2) y la ecuación (3) tanto para alta como para baja temperatura, ambas para un nivel de confiabilidad de 98%. Para obtener parámetros necesarios para la aplicación de dicha ecuación, se tomó el producto final del trabajo de investigación de Rubio [16].

$$T_{(pav)} = 54.32 + 0.78T_{(air)} - 0.0025Lat^2 - 15.14\log_{10}(H + 25) + z(9 + 0.61s_{air}^2)^{1/2} \quad (2)$$

En donde;  $T_{(pav)}$  = La Temperatura del pavimento bajo la superficie, °C,  $T_{air}$  = La alta Temperatura del Aire, °C,  $Lat$  = La Latitud donde se tomó la Temperatura,  $H$  = Profundidad desde la Superficie, mm,  $s_{air}^2$  = Desviación Estándar del Promedio de los 7 días con Temperaturas altas, °C,  $z$  = De la Tabla 1,  $z$  = 2.055 para un 98% de Confiabilidad.

$$\log E = 3.750063 + 0.029932P_{200} - 0.001767P_{200}^2 - 0.002841P_4 - 0.058097V_a - 0.802208 \left( \frac{V_{bff}}{V_{bff} + V_a} \right) + \frac{3.871977 - 0.0021P_4 + 0.003958P_{38} - 0.000017P_{38}^2 + 0.005470P_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.31335\log(f) - 0.393532\log(\eta))}} \quad (1)$$

# Implementación de un modelo climático a un sistema probabilístico de diseño de pavimentación flexibles empírico-mecanicista

$$T_{pav} = -1.56 + 0.72T_{(air)} - 0.004Lat^2 + 6.26Log_{10}(H + 25) - z(4.4 + 0.52S_{air}^2)^{1/2} \quad (3)$$

En dónde;  $T_{(pav)}$  = La menor Temperatura del pavimento bajo la superficie, °C,  $T_{air}$  = La Temperatura menor del Aire, °C,  $Lat$ =La Latitud donde se tomó la Temperatura,  $H$ = Profundidad desde la Superficie, mm,  $S_{air}^2$  = Desviación Estándar del Promedio de los 7 días con Temperaturas altas, °C,  $z$ = De la Tabla 1,  $z = 2.055$  para un 98% de Confiabilidad.

### 3.1.2 Modelo climático para contenido de agua del suelo

La mejor manera de caracterizar los materiales que constituyen las capas de suelos es en términos de módulo resiliente ( $M_R$ ). El contenido de agua puede afectar de manera significativa el desempeño estructural de una capa de suelo; cuanto mayor sea el contenido de agua, el  $M_R$  será menor. Sin embargo, el contenido de agua puede afectar de dos maneras diferentes a las capas de la estructura del pavimento:

- Puede afectar el estado de esfuerzos, a través de la succión o la presión de poro.
- Puede afectar la estructura del suelo, a través de la destrucción de la cementación entre sus partículas.

El valor del  $M_R$  en laboratorio se determina en condiciones óptimas, por esta razón el valor óptimo será el que se tome como referencia. De acuerdo con lo anterior y con base en MEPDG [2], se considera que: las capas de suelo se compactan con grado de saturación óptimo ( $S_{opt}$ ), que el grado de saturación ( $S$ ) cambia (incrementa o decrece) a un valor de grado de saturación de equilibrio ( $S_{equil}$ ) con el tiempo. Para cualquiera de estos casos,  $S_{equil}$  se podrá determinar utilizando el nivel de aguas freáticas (NAF) y la curva característica de la capa del suelo respectiva.

Las condiciones de contenido óptimo de agua en subrasantes de carreteras con pavimentos impermeables se analizarán considerando tres condiciones climatológicas y geotécnicas representativas del laboratorio de transporte de Inglaterra [3]:

Categoría (1). Subrasantes con nivel freático suficientemente cercano a la superficie del terreno para así controlar su contenido de agua. Además de las zonas donde el nivel freático se mantiene debido al régimen climático, esta categoría incluye fajas costeras y llanuras de inundación, en las que el nivel lo regulan el mar, lagos o ríos.

Categoría (2). Subrasantes con nivel freático profundo y

donde la lluvia es suficiente para producir cambios estacionales significativos bajo el camino. La precipitación pluvial en esas áreas generalmente rebasa los 250mm por año, con distribución estacional.

Categoría (3). Subrasantes en zonas sin nivel freático permanente cerca de la superficie del terreno y clima árido a lo largo del año. En estas zonas la precipitación anual es de 250mm o menos.

El modelo climático para la categoría 1 consiste en realizar una corrección del módulo resiliente de las capas de suelo que conforman la estructura del pavimento. Esta corrección está en función del grado de saturación que se presente en cada capa de suelo, para lo cual se empleará la siguiente ecuación [2]:

$$\log \frac{M_R}{M_{Ropt}} = a + \frac{b - a}{1 + EXP \left( \ln \frac{-b}{a} + k_m(Sr - Sr_{opt}) \right)} \quad (4)$$

En donde;  $M_R/M_{Ropt}$  = Relación del módulo resiliente;  $M_R$  = Módulo resiliente en cierto tiempo,  $M_{Ropt}$  = Módulo resiliente en una condición de referencia,  $a$  = Valor mínimo de  $\log M_R/M_{Ropt}$ ,  $b$  = Valor máximo de  $\log M_R/M_{Ropt}$ ,  $k_m$  = Parámetro de regresión,  $(Sr - Sr_{opt})$  = Variación en el grado de saturación expresado en decimal.

En la Figura 3 se muestra un diagrama de flujo del proceso para la corrección del  $M_R$ . Se parte del análisis de las curvas de compactación del material correspondiente a cada capa de la estructura del pavimento flexible, de las cuales obtenemos el valor de la densidad seca máxima ( $\gamma_{dmax}$ ) y el contenido gravimétrico de agua óptimo ( $w_{opt}$ ). Posteriormente se determinará el valor de la succión ( $h$ ) a partir del modelo descrito por Huang [8], basado en el equilibrio hidrostático del agua. Por otro lado, con la curva característica correspondiente a cada material se determina el grado de saturación ( $S_r$ ). Una vez determinado el valor del grado de saturación ( $S_r$ ), este se introduce en la ecuación (4) mediante la cual se determinará el valor real del  $M_R$  a utilizar en el análisis estocástico.

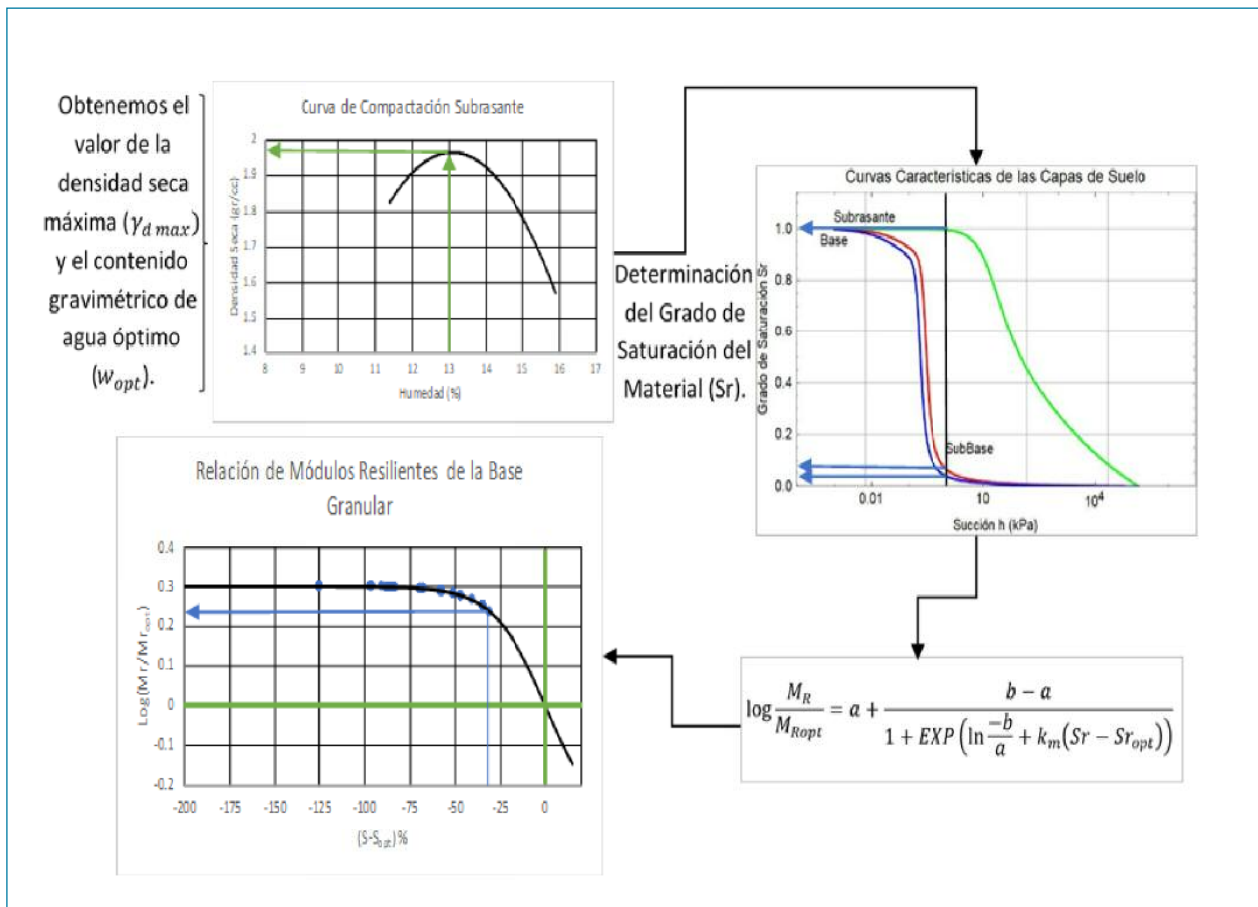


Figura 3. Proceso para estimar el valor del módulo resiliente

#### 4. Caso de estudio y análisis de resultados

Para llevar a cabo el estudio correspondiente en este artículo, se solicitaron datos reales del control de calidad de la construcción de un pavimento flexible. Estos datos que se obtuvieron fueron derivados de conocer el grado de compactación de las distintas capas que conforman la estructura del pavimento. La selección de las muestras se debe realizar empleando una tabla de números aleatorios compuesta, de acuerdo con lo especificado en la Norma M-CAL-1-02-01 [10].

En la cuestión del clima, los parámetros considerados son el contenido de agua en las capas de suelos y la temperatura del aire. Para el caso de la temperatura, los registros se encuentran en estaciones climatológicas establecidas en puntos específicos sobre el territorio nacional. Por tal motivo, de una base de datos climáticos se obtienen los valores correspondientes a la temperatura, posteriormente se utilizó el trabajo elaborado por Rubio el cual permitió generar la información necesaria para emplear el modelo climático de temperatura descrito en este

artículo.

El MR depende del tipo de suelo y contenido de agua y para estimarlo es necesario conocer ciertas características climatológicas, geotécnicas de estructuración y diseño de la carretera. Por cuestiones prácticas la condición evaluada en este artículo para contenido de agua en subrasantes de carreteras con pavimentos impermeables, se analizará considerando únicamente la condición de la categoría 1 descrita en el apartado 3.1.2 de este artículo. Los contenidos de agua empleados se muestran en la Tabla 1.

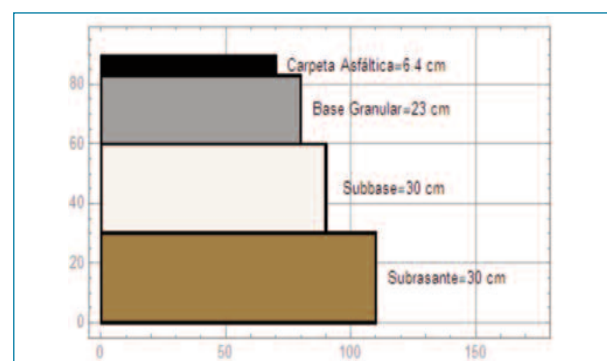


Figura 4. Estructura de pavimento flexible del tramo analizado

# Implementación de un modelo climático a un sistema probabilístico de diseño de pavimentación flexibles empírico-mecanicista

En la Figura 4 se presenta una estructura de pavimento flexible de cuatro capas compuesta de una mezcla asfáltica en caliente (HMA), que se apoya sobre una base granular, una capa de subbase y por último una subrasante. La Tabla 1 muestra las propiedades mecánicas de los materiales. Las propiedades del material se eligieron para ser representativas y consistentes con los estudios previos en la zona.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los materiales de las capas de suelos

Capa	Espesor (cm)	Contenido de Agua (%)	CBR (%)	Desviación Estándar
Terraplén	Variable	14.68	5	0.2
Subrasante	30	12.55	20	0.2
Subbase	30	12.55	60	0.2
Base	23	10.88	100	0.2

A partir de estaciones de pesaje móviles (WIM), se obtuvieron los datos correspondientes a los espectros de carga para cada tipo de eje (sencillo, tandem y tridem) que se muestran en la Figura 5.

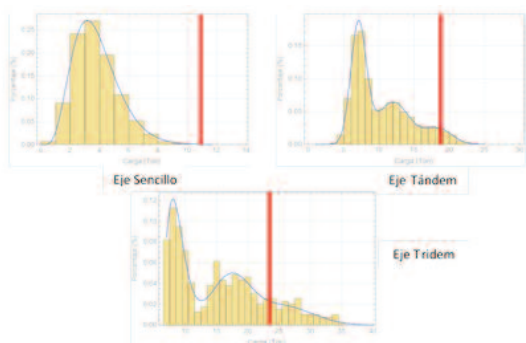


Figura 5. Espectros de carga

El módulo dinámico de la carpeta asfáltica se obtuvo mediante el método de Witczak (ver ecuación 1), a partir de los datos de los agregados pétreos y del cemento asfáltico de la carpeta. De las variaciones de los grados de compactación del control de calidad de las capas de suelos, se derivaron distribuciones de probabilidad de tipo normal para cada una de las capas del pavimento.

El modelo de diseño presentado en este artículo se compone de varios sistemas de cálculo (espectros de carga, vida útil del pavimento y esfuerzos y deformaciones). Este modelo de simulación considera los siguientes aspectos fundamenta-

les:

1. Se implementa el uso de espectros de carga, como una manera adecuada de caracterizar el tránsito vehicular. Además, se ajusta una función de distribución de probabilidad que describe su comportamiento.
2. Se utilizan valores de presiones de inflado de 5.8 kg/cm<sup>2</sup> y 7 kg/cm<sup>2</sup> para el cálculo de deformaciones de tensión y compresión. De acuerdo con las cargas que transitan sobre la vialidad.
3. Cuando se emplean las funciones de transferencia de desempeño de la UNAM, el parámetro que define la resistencia de las capas de suelos es el CBR y cuando se emplean las funciones del TRRL, el parámetro usado es el M<sub>R</sub>. Mientras que el módulo dinámico es el parámetro que define la resistencia de la carpeta asfáltica.
4. Se implementa el modelo de simulación de Monte Carlo para analizar la variabilidad de las condiciones *in-situ*.
5. Permite analizar el comportamiento de la estructura del pavimento ante cada tipo de eje, mediante espectros de daño y de vida útil de manera individual.

Los modelos de deterioro que se utilizaron fueron los siguientes:

Modelo de deterioro por fatiga de la carpeta asfáltica del método de la UNAM:

$$\log \varepsilon = 3.78 - 0.088U - 0.21 \log N_f \quad (5)$$

En donde:  $\varepsilon$  = deformación de tensión horizontal en la parte inferior de la carpeta asfáltica;  $N_f$  = número de ciclos hasta llegar a la falla por fatiga;  $U$  = abscisa de la distribución normal estándar para un nivel de confianza  $Q_u$  del 85 %.

Mientras que para deformaciones permanentes del método de la UNAM:

$$\log \Sigma L = \frac{1}{0.1761} (\log VRS_z - \log VRS_0 - \log F_z) \quad (6)$$

En dónde:  $\Sigma L$  = número de ciclos hasta llegar a la falla por deformación permanente;  $(VRS)_z$  = estimación del valor relativo de soporte crítico esperado en campo;  $(VRS)_0$  = constante experimental igual a 10B; para bases  $B = 0.8477 + 0.14U$  y



para subbases y terracerías  $B = 0.4547 + 0.1593U$ ;  $U$  = abscisa de la distribución normal estándar para un nivel de confianza  $Q_u$  del 85%;  $F_z$  = coeficiente de influencia de Boussinesq.

Modelo de deterioro para fatiga de la carpeta asfáltica del TRRL del Reino Unido para un 85% de confiabilidad:

$$N_f = 1.66 \times 10^{-10} \epsilon_t^{-4.32} \quad (7)$$

En donde:  $N_f$  = número de repeticiones predichas para llegar a la falla;  $\epsilon_t$  = deformación de tensión horizontal en la parte inferior de la carpeta asfáltica.

Modelo de deterioro por deformación permanente del TRRL del Reino Unido para un 85% de confiabilidad:

$$N_d = 6.18 \times 10^{-8} \epsilon_c^{-3.95} \quad (8)$$

En donde:  $N_d$  = número de repeticiones predichas para llegar a la falla;  $\epsilon_c$  = deformación de compresión vertical en la parte superior de la subrasante.

Por otra parte, se desarrolló una herramienta computacional (SIP-PAV) donde se puede generar la geometría de la estructura del pavimento, introducir las propiedades de los materiales, la configuración de cada tipo de eje, cálculo de la vida útil del pavimento. Las características principales de esta herramienta son:

- Sistema para geometría y propiedades de los materiales. Permite especificar los espesores de cada una de las capas del pavimento. Además, permite proponer el módulo dinámico de la carpeta asfáltica y los CBRs (UNAM) o  $M_R$  (TRRL) de las capas de suelos, así como también sus respectivas desviaciones estándar.
  - Sistema para la configuración de los tipos de ejes. Este asistente tiene como función, especificar la cantidad de cada tipo de eje, las cargas para cada tipo de eje y la cantidad de ejes por carga.
  - Sistema para el cálculo de la vida útil del pavimento. Tiene como función determinar la vida útil del pavimento en términos del número de repeticiones de cargas y el periodo de vida en años.
- Con el propósito de realizar una comparación entre meto-

dologías de diseño de pavimentos flexibles, se planteó el uso de los programas: IMT-PAVE 3.0, PerRoad 4.3 y comparar los resultados con los obtenidos a través de la metodología desarrollada en este artículo. En la Tabla 2 se muestran los resultados del análisis comparativo. En ella se muestra la vida útil para los dos criterios de falla de la estructura del pavimento representada en años.

Tabla 2. Vida útil en años empelando modelos climáticos

Modelo	SIP-PAV (ecuaciones TRRL)	SIP-PAV (ecuaciones UNAM)	IMT-PAVE	PerRoad
Fatiga	1.02	0.15	< 1	0.28
Deformación Permanente	0.40	250	1.4	1.55

Posteriormente se analizó el caso de una alternativa de solución, orientado a incrementar el estándar funcional de la estructura de pavimento existente. El mejoramiento de la capacidad estructural del material existente en el camino puede lograrse generalmente mediante procesos de estabilización, por el aporte de capas de nuevo material, y en algunas ocasiones, por medio de la incorporación de elementos estructurales externos al mismo suelo. Para este caso particular se propone modificar los espesores de las capas (Figura 8), así mismo, se propone mejorar la resistencia de las mismas elevando los valores tanto del módulo dinámico como del módulo resiliente (Tabla 3); siempre y cuando cumplan con lo estipulado en la normativa SCT.

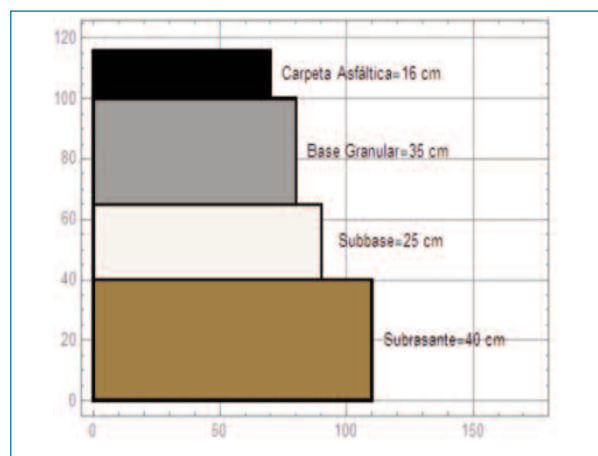


Figura 8. Alternativa de estructura de pavimento flexible

Como podemos apreciar en las Tablas 2 y 4, se presentan marcadas diferencias entre los resultados de las metodologías

# Implementación de un modelo climático a un sistema probabilístico de diseño de pavimentación flexibles empírico-mecanicista

empleadas para la revisión de la estructura de pavimento, especialmente en los resultados referentes a la deformación permanente de la capa subrasante. Estas diferencias se presentan como consecuencia de que programas como el IMT-PAVE no incluyen modelos climáticos tanto para temperatura como para contenido de agua, así mismo no muestra las técnicas probabilísticas para modelar las propiedades de los materiales; en el caso del PerRoad no considera un modelo climático para contenido de agua en las capas de suelos.

Tabla 3. Módulos resilientes y dinámico para la alternativa de solución

Capa	Módulo (kg/cm <sup>2</sup> )
Subrasante	2283.75
Subbase	2793.72
Base	3265.45
Carpeta Asfáltica	44000

Tabla 4. Vida útil en años para alternativa de solución

Modelo	SIP-PAV (ecuaciones TRRL)	SIP-PAV (ecuaciones UNAM)	IMT-PAVE	PerRoad
Fatiga	16.34	9.54	> 15	1.5
Deformación Permanente	23.94	503	> 15	45.2

## 5. Conclusiones

La aportación principal que se obtuvo de este artículo es la implementación de modelos climáticos a una metodología de diseño de pavimentos flexibles empírico-mecanicista basada en el método de simulación Monte Carlo, que considera una adecuada caracterización de las propiedades de los materiales, temperatura, contenido de agua y tránsito en términos de espectros de carga; entendiendo el efecto de cada variable en el diseño.

Entre las aportaciones derivadas de la metodología implementada es solventar algunos de los problemas que permanecen abiertos en el diseño de pavimentos flexibles, para países

en vías de desarrollo (e.g. México), tales como:

- 1) Obtención confiable de la información de las condiciones climatológicas, propiedades de los materiales y el tránsito mediante una caracterización adecuada de dichas variables de entrada. Esto disminuye los errores de captura y/o en la obtención de las pruebas de laboratorio al caracterizar el comportamiento de los datos de entrada eliminando datos atípicos.
- 2) Reduce la inversión tiempo-costo en el procesamiento de la información, ya que realiza un análisis de la variabilidad de las condiciones in-situ a través de técnicas probabilísticas que determinan el comportamiento de las variables de entrada mediante funciones de distribución de probabilidad. Esto a su vez, permite disminuir el sesgo o incertidumbre en el diseño de pavimentos flexibles.
- 3) Mejora del desempeño de los pavimentos flexibles en términos de durabilidad, a través de un análisis estocástico basado en la metodología empírico-mecanicista para la determinación de la vida útil de un pavimento flexible.

## 6. Referencias

- [1] AASHTO. (1993). Guide for Design of Pavement Structures. Washington, D.C.
- [2] AASHTO. (2004). Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures.
- [3] Au, R., & JL, S. (1993). A Guide to the Structural Design of Bitumen-Surfaced Roads in Tropical and Sub-Tropical Countries. Crowthorne, Berkshire, United Kingdom: Citeseer.
- [4] Coria, C., Chávez, C., Alarcón, J., & Arreygue, E. (2012). Elaboración de un Programa de Diseño de Pavimentos Flexibles.
- [5] Corro, S., Magallanes, R., & Prado, G. (1981). Instructivo para Diseño Estructural de Pavimentos Flexibles para Carreteras. México, DF.: Series del Instituto de Ingeniería.
- [6] Elizondo, F., Badilla, G., & Ulloa, Á. (2007). Predicción de Módulos Resilientes en Mezclas Asfálticas Mediante el Modelo de Witczak. Infraestructura Vial.
- [7] Granica Aguas, P., & Hernández Domínguez, R. (2013). Diseo Estructural de Pavimentos para Condiciones de Alto Tránsito Vehicular. Laboratorio de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte.

- [8] Huang, Y. (2004). Pavement Analysis and Design. UNIVERSITY OF KENTUCKY: PEARSON.
- [9] Leiva Villacorta, F., Camacho Garita, E., & Aguilar Moya, J. (2016). Similation of weather conditions on full scale accelerated pavement testing. *Infraestructura Vial*, 20-29.
- [10] M-CAL-1-02-01. (2001). Criterios Estadísticos de Muestreo.
- [11] Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. (2003). NORMA 6.1 IC SECCIONES DE FIRME, DE LA INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS.
- [12] Mohseni, A. (1998). LTPP Seasonal Asphalt Concrete (AC) Pavement Temperature Models". No. FHWA-RD-97-103.
- [13] Rico, A., Téllez, R., & Garnica, P. (1998). Pavimentos Flexibles. Problemática, Metodologías de Diseño y Tendencias. Sanfandila, Querétaro: Publicación Técnica No. 104.
- [14] Rodríguez, M., Thenoux, G., & Gonzáles, A. (2016). Probabilistic Assessment of Asphalt Pavement Design. *Revista Ingeniería de Construcción*. Recuperado el 10 de Diciembre de 2016
- [15] Rondón, H., & Reyes, F. (2007). Metodología de Diseño de Pavimentos Flexibles: Tendencias, Alcances y Limitaciones.
- [16] Rubio, S. (2018). Metodología para la Construcción de Mapas de Temperatura Basada en la Influencia Termotopográfica y el Grado de Desempeño Aplicada en la Selección de Cementos Asfálticos. Morelia.
- [17] SCOI. (2007). Catálogo de Firmes y Pavimentos de la Ciudad de Valencia.
- [18] SCT. (2013). Catálogo de Secciones Estructurales de Pavimentos para las Carreteras de la República Mexicana. México, DF.
- [19] Timm, D. H., & Newcomb, D. (2006). Perpetual pavement desing for flexible pavements in the US. *International Journal of Pavement Engineering*, 111-119.
- [20] Turochy, R. D., Timm, D. H., & Tisdale, S. M. (2005). TRUCK EQUIVALENCY FACTORS, LOAD SPECTRA MODELING AND EFFECTS ON PAVEMENT DESIGN. Montgomery, Alabama.
- [21] Urbaéz, E., & Erskine, J. (2011). Project Level Australian Methodology for Flexible Pavement Design. Sydney.