



**UNIVERSIDAD MICHUACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE  
INGENIERÍA CIVIL**

***“MODELO DE SIMULACIÓN EMPÍRICO-MECANICISTA PARA DETERMINAR LA  
VIDA ÚTIL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES BASADO EN MONTE CARLO”***

**TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS VÍAS  
TERRESTRES**

**PRESENTA**

**ING. JOSÉ OMAR MELCHOR BARRIGA**

**ASESOR: DR. CARLOS CHÁVEZ NEGRETE**

**CO-ASESOR: DR. LUIS ALBERTO MORALES ROSALES**

**CO-ASESOR: DR. NELIO PASTOR GÓMEZ**

**Morelia, Michoacán. Septiembre de 2018**

# Resumen

En México, es necesario mejorar la calidad y el diseño de los pavimentos flexibles, debido a los constantes casos de baja calidad en la vida útil que se han presentado en las últimas décadas. Para ello se propone analizar probabilísticamente la variabilidad del tránsito y propiedades mecánicas de los materiales, con la finalidad de mejorar significativamente su desempeño.

En este trabajo de investigación se aplicó la metodología empírico-mecanicista para el diseño de pavimentos flexibles. El análisis de esfuerzos y deformaciones en cada capa se realizó con el método de Odemark. Para determinar la vida útil por deformación permanente y por fatiga de la carpeta asfáltica, se utilizaron las funciones de transferencia de desempeño del pavimento deducidas del método de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y funciones de transferencia generales como las del Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

Para realizar el ajuste de las variables de entrada (tránsito, módulo dinámico de la carpeta asfáltica y CBRs de las capas de suelo), se utilizaron técnicas probabilísticas que nos permitieron determinar su función de distribución de probabilidad. A partir de esto, se pudo generar aleatoriedad a cada variable y se realizó el análisis empírico-mecanicista. El análisis probabilístico se validó mediante el método de simulación Montecarlo y con ello se determinó el comportamiento del pavimento *in-situ*.

Se presenta un caso práctico con datos reales del control de calidad de la construcción de un pavimento flexible proporcionados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Como parámetros de entrada se utilizaron las características mecánicas deducidas del suelo compactado en campo de cada capa mediante ensayos de mecánica de suelos. Además, de la recolección de datos de tránsito se obtuvieron los espectros de carga de cada uno de los diferentes tipos de ejes y el Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA). Posteriormente, de una base de datos climáticos se obtienen los valores correspondientes para la temperatura.

Finalmente, se pudo determinar el número total de repeticiones de carga para llegar a la falla y la probabilidad de que ésta suceda. Se analizan detenidamente los resultados en términos de espectros de vida útil y se comparan con los obtenidos de un análisis determinístico.

**Palabras Clave:** Pavimentos Flexibles, Análisis Probabilístico, Esfuerzos, Deformaciones, Módulo Dinámico y Módulo Resiliente.

# Abstract

Road infrastructure is one of the main problems in Mexico today. Therefore, in the last decades the development of the country has allowed to have important advances in the regulation of flexible pavements. Actually, new design methods have been developed, which due to their complexity have led to the development of computer programs.

In this research the mechanistic empirical methodology for the design of flexible pavements was applied. The analysis of stresses and deformations in each layer was performed with the Odemark method. To determine the useful life due to permanent deformation and fatigue of the asphalt binder, the pavement performance transfer functions derived from the method of the Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) and general transfer functions such as those of the Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

To adjust the input variables (traffic, dynamic module of the asphalt folder and CBRs of the soil layers), probabilistic techniques were used that allowed us to determine their probability distribution function. From this, randomness could be generated for each variable and the empirical-mechanic analysis was carried out. The probabilistic analysis was validated using the Montecarlo simulation method and with it the in-situ pavement behavior was determined.

A practical case is presented with real data of the quality control of the construction of a flexible pavement provided by the Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT). As input parameters, the mechanical characteristics deduced from the compacted soil in the field of each layer were used through soil mechanics tests. In addition, from the collection of traffic data, the load spectra of each of the different types of axes and the Annual Average Daily Traffic (TDPA) were obtained. Afterwards, the corresponding values for the temperature are obtained from a climatic data base.

Finally, it was possible to determine the total number of load repetitions to arrive at the failure and the probability of it happening. The results are analyzed carefully in terms of the useful life spectra and compared with those obtained from a deterministic analysis.

**Keywords:** Flexible Pavements, Probabilistic Analysis, Efforts, Deformations, Dynamic Module and Resilient Module.

# Agradecimientos

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de esta maestría, por darme fortaleza en tiempos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

Le agradezco sinceramente a mi asesor de tesis, Dr. Carlos Chávez Negrete, su esfuerzo y dedicación. Sus conocimientos, orientación, manera de trabajar, persistencia, paciencia y motivación han sido fundamentales para mi formación profesional y personal. Él ha inculcado en mi un sentido de seriedad, responsabilidad y rigor académico sin los cuales no podría haber concluido este trabajo de investigación. A su manera, ha sido capaz de ganarse mi lealtad y admiración, así como sentirme en deuda con él por todo lo recibido durante el tiempo que ha durado esta tesis.

Agradezco al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo y patrocinio económico para la realización de este proyecto de tesis.

Agradezco a mi Posgrado de Ingeniería Civil, por haberme permitido formar parte de una generación más, nido de muchos que al igual que yo eligieron esta extraordinaria maestría y que con orgullo, amor, pasión, dignidad y respeto representaré ante toda la sociedad.

# Dedicatoria

*A mis padres.*

Porque creyeron en mí y porque me sacaron adelante, dándome ejemplos dignos de superación y entrega; porque en gran parte gracias a ustedes hoy puedo ver alcanzada una meta más, ya que siempre estuvieron impulsándome en momentos difíciles de esta maestría. Y porque el orgullo que sienten por mí fue lo que me motivó a llegar hasta el final.

*A mi hermano Jorge.*

Porque has sido la guía y el camino para poder llegar a este punto de mi carrera. Porque con tu ejemplo, dedicación y palabras de aliento nunca bajaste los brazos para que yo tampoco lo hiciera aun cuando todo se complicaba.

# Índice de Contenido

1	Introducción .....	1
1.1	Problemática .....	3
1.2	Justificación .....	5
1.3	Objetivos .....	6
1.3.1	Objetivo principal .....	6
1.3.2	Objetivos específicos .....	6
1.4	Propuesta de Solución .....	7
2	Marco Teórico .....	8
2.1	Métodos Determinísticos y Probabilísticos de Diseño de Pavimentos .....	8
2.1.1	Confiabilidad .....	9
2.2	Métodos de Simulación .....	10
2.2.1	Método de Monte Carlo .....	10
2.3	Metodología Empírico-Mecanicista de Diseño de Pavimentos Flexibles .....	11
2.4	Parámetros de Entrada Requeridos para el Análisis Probabilístico .....	14
2.4.1	Módulo Dinámico de la Carpeta Asfáltica .....	14
2.4.1.1	Selección del Asfalto Grado PG .....	15
2.4.2	Módulo Resiliente de las Capas Suelo .....	16
2.4.2.1	Módulo de Resiliencia en Función del Contenido de agua del Suelo .....	17
2.4.3	Espectros de Carga y Daño para Diseño de Pavimentos .....	17
2.4.3.1	Espectros de Carga .....	17
2.4.3.2	Espectros de Daño .....	21
3	Estado del Arte .....	24
3.1	Métodos Determinísticos .....	24
3.1.1	Métodos Determinísticos Híbridos .....	24
3.1.1.1	Método del Instituto de Ingeniería de la UNAM .....	24
3.1.1.2	Método del Instituto del Asfalto de EUA .....	25
3.1.1.3	Método AASHTO 1993 para el Diseño de la Sección Estructural de Pavimentos .	26
3.1.1.4	Catalogo Español de Secciones de Firme .....	26
3.1.1.5	Metodología Australiana para el Diseño de Pavimentos Flexibles .....	27

3.1.1.6	Método UMICH-PAV .....	27
3.1.1.7	Catálogo de Secciones Estructurales de Pavimentos para Carreteras de la República Mexicana.....	27
3.2	Métodos Probabilísticos.....	28
3.2.1	Métodos Probabilísticos que Consideran Espectros de Carga .....	28
3.2.2	Métodos Probabilísticos Híbridos .....	29
4	Desarrollo del Análisis Estocástico Basado en la Metodología Empírico-Mecanicista .....	30
4.1	Metodología .....	30
4.2	Caracterización y Pre-procesamiento de las Condiciones <i>In-Situ</i> .....	34
4.3	Aplicación de Modelos Climáticos.....	35
4.3.1	Modelo Climático para Temperatura.....	35
4.3.2	Modelo Climático para Grado de Saturación .....	37
4.3.2.1	Modelo Climático para la Categoría 1 del AASHTO 2004.....	39
4.3.2.2	Elección de Condiciones Óptimas como Referencia y Condiciones Iniciales para $M_R$ .....	40
4.3.2.3	Determinación de la Densidad Seca Máxima y del Contenido de Agua Gravimétrico Óptimo.....	43
4.3.2.4	Modelo de Equilibrio de Humedad .....	45
4.3.2.5	Curva Característica de los Materiales de las Capas de Suelo .....	46
4.4	Aplicación de Métodos de Simulación .....	48
4.5	Determinación de la Vida Útil de la Estructura del Pavimento.....	49
4.5.1	Funciones de Transferencia .....	50
4.5.2	Determinación del Daño .....	52
5	Resultados .....	55
5.1	Modelo del sistema .....	55
5.2	Selección del Modelo .....	58
5.3	Datos de Entrada.....	59
5.4	Ajuste de Espectros de Carga .....	62
5.5	Análisis Probabilístico.....	63
5.6	Histogramas.....	64
5.7	Caso de Estudio .....	65
5.7.1	Análisis de Histogramas del Caso de Estudio .....	72

5.8	Alternativa de Mejoramiento de la Estructura de Pavimento Flexible Analizada .....	82
5.9	Comparativa de Métodos de Diseño.....	85
	Conclusiones .....	95
	Recomendaciones .....	96
	Trabajo Futuro.....	96
	Bibliografía .....	97
	Anexo A .....	100



# 1 Introducción

Una de las principales problemáticas hoy en día en México es la infraestructura vial. Por lo que, en las últimas décadas el desarrollo del país ha permitido tener avances importantes en la normativa de los pavimentos flexibles. En la actualidad se han desarrollado nuevos métodos de diseño, que por su complejidad han llevado al desarrollo de programas computacionales.

Los pavimentos flexibles, son aquellos que su estructura se encuentra compuesta por capas superpuestas con distintas calidades en cada una de ellas. Estos pavimentos están diseñados para soportar las sollicitaciones del tránsito y clima. En la actualidad los pavimentos flexibles son diseñados como un sistema de capas, con distintas propiedades mecánicas en cada una de ellas, disminuyendo la calidad de éstas conforme a la profundidad. Este tipo de diseños se analizan como un sistema multicapa, en el cual cada capa es elástica e isotrópica (sus propiedades son las mismas en todas las direcciones). Dicho sistema se forma con un área circular uniformemente cargada de radio  $a$ , que representa la llanta de un vehículo. En el diseño estructural de pavimentos existen dos criterios de falla: deformaciones permanentes y fatiga de la carpeta asfáltica (Huang, 2004).

Con el avance tecnológico, el país ha tenido acceso a las diferentes metodologías de diseño de pavimentos, siendo los métodos empíricos-mecanicistas los más utilizados. Los cuales permiten tener un análisis completo del comportamiento mecánico del pavimento ante la aplicación de cargas. Este tipo de metodologías toma en cuenta cómo los estados de esfuerzos y deformación presentes en las capas influyen en el comportamiento de dichos pavimentos. Este tipo de metodologías requieren una modelación previa tanto de la estructura del pavimento como de las cargas. Debido al gran desarrollo de los programas de computación, muchas de las teorías de análisis pueden aplicarse a las condiciones prácticas (Rondón & Reyes, 2007).

Sin embargo, existen diversos problemas en el diseño de pavimentos flexibles; Por una parte, en el diseño basado en metodologías empírico-mecanicistas se presentan problemas para la obtención confiable de la información de las condiciones *in-situ*, tanto para proyectos nuevos como para estructuras en servicio. Por otra parte, errores de captura y/o errores en la obtención de las pruebas de laboratorio, lo que hace variables los parámetros para calibrar adecuadamente los modelos de diseño. Esto conlleva a que los diseños incluyan errores debido al pre-procesamiento de la información. Aunado a esto, los métodos de diseño de pavimentos flexibles no cuentan con una herramienta computacional que permita el diseño con base en métodos probabilísticos.

Es importante mencionar que todos los métodos de diseño deben incorporar la confiabilidad, para proteger el diseño de la incertidumbre de las cargas del tránsito, condiciones ambientales, evolución del deterioro, propiedades mecánicas y desempeño estructural de los materiales (AASHTO, 1993). La confiabilidad está definida “como la probabilidad de que una sección de pavimento diseñado usando dicho proceso se desempeñe de manera satisfactoria, bajo ciertas condiciones ambientales y de tránsito durante el periodo de vida” (AASHTO, 1993).

Ya que algunas de las metodologías empírico-mecanicistas no emplean técnicas probabilísticas que permitan analizar la variabilidad de las condiciones in-situ, realizar un pre-procesamiento estadístico y eliminar datos atípicos presentes en las variables de entrada. Se requirió de la unión con los métodos probabilísticos. Esto permitió identificar el comportamiento y analizar la variabilidad de las condiciones in-situ.

Partiendo de lo descrito anteriormente, se desarrolla una herramienta computacional de simulación que facilite al proyectista el diseño de pavimentos flexibles. Es un modelo de simulación que se basa en el método de simulación Montecarlo, con el cual se busca evaluar de manera reiterada, la respuesta que tiene el diseño de la estructura del pavimento al tomar en cuenta sus condiciones *in situ*, cuando estas se representan como funciones de densidad de probabilidad.

El método de Montecarlo es un método de simulación, que consiste en elegir números aleatorios asociados a una función de distribución de probabilidad con parámetros identificados. (Martins, Ferreira, Pardal, & Morano, 2012).

Por lo anterior, una de las principales razones para la elaboración de este proyecto de investigación es mejorar la infraestructura vial, mediante la actualización de teorías y metodologías que nos ayuden en el diseño de nuevos pavimentos flexibles bajo las condiciones de tránsito vehicular y clima existentes México.

## 1.1 Problemática

El crecimiento del país por mínimo que sea, trae consigo un aumento en el comercio, el cual a su vez requiere un mayor número de transporte terrestre, lo que marca un incremento en el Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA).

Uno de los retos que presenta el aumento del tránsito es garantizar la calidad de la infraestructura vial, lo que conllevará a que la red nacional de caminos ofrezca mejores servicios a la sociedad. Para ello se han enfatizado las investigaciones en el diseño de pavimentos, tanto rígidos como flexibles. Sin embargo, el alto costo inicial de inversión para el desarrollo de pavimentos rígidos, aunado a los problemas medioambientales, han hecho que el estudio de los pavimentos flexibles sea una opción viable para la infraestructura de los países que buscan un equilibrio entre el costo de inversión como durabilidad (Espinosa & Alarcón, 2012). De acuerdo con esto, la caracterización adecuada de las condiciones *in-situ* tales como el tránsito, propiedades de los materiales y el clima, es fundamental para concebir estructuras de pavimento que nos ofrezcan altos desempeños en términos de durabilidad.

Las investigaciones realizadas respecto al diseño de pavimentos flexibles durante las últimas décadas, nos han permitido tener avances importantes en la innovación de dichos pavimentos. De acuerdo con lo anterior, las metodologías de diseño han pasado de las metodologías puramente empíricas a las empírico-mecanicistas. Así como también, se han desarrollado ciertos programas computacionales que nos facilitan el diseño de los pavimentos flexibles (IMT-PAVE, DISPAV 5.0, etc.).

Sin embargo, existen distintos problemas que permanecen abiertos en cuanto al diseño de pavimentos flexibles. Por un lado, en el diseño basado en metodologías empírico-mecanicistas se presentan problemas para la obtención confiable de la información de las condiciones *in-situ*, tanto para proyectos nuevos como para estructuras en servicio. Por otro lado, errores de captura y/o errores en la obtención de las pruebas de laboratorio, lo que hace variables los parámetros para calibrar adecuadamente los modelos de diseño. Esto conlleva a que los diseños incluyan errores debido al pre-procesamiento de la información. Un hecho a resaltar es que los datos no están uniformemente distribuidos, lo que no permite identificar el comportamiento de los parámetros de entrada. Además, se requiere de una selección de técnicas probabilísticas que permitan un pretratamiento estadístico para ordenar la información y eliminar los datos atípicos presentes en los datos.

Aunado a esto, los métodos de diseño de pavimentos flexibles desarrollados en México, hasta el momento no cuentan con una herramienta computacional que permita el diseño con base en métodos probabilísticos. La falta de herramientas computacionales conlleva a una gran inversión tiempo-costo para el procesamiento de la información. Asimismo, las metodologías empírico-mecanicistas al no considerar técnicas probabilísticas limitan el análisis de la variabilidad de las condiciones *in-situ*. Además, la incertidumbre al realizar los cálculos también se ve afectada, ya que los métodos de diseño empleados tradicionalmente dependen del criterio del diseñador. Al diseñar

con una alta incertidumbre los diseños de pavimentos presentan un sobre o sub diseño en términos de durabilidad. Los proyectistas al realizar los cálculos buscando una durabilidad acorde con las condiciones *in-situ* requieren visualizar y analizar el comportamiento estructural de los pavimentos al variar sus condiciones; lo que generaría una mayor confiabilidad de los diseños de pavimentos flexibles.

## 1.2 Justificación

El diseño de estructuras de pavimento es un área en pleno desarrollo en México que busca incrementar la durabilidad de los pavimentos mejorando las condiciones de la infraestructura vial. El crecimiento del transporte nacional en número y peso de los vehículos impacta en gran medida en el desempeño de la estructura, ya que acelera su deterioro. Por este motivo se requiere implementar una metodología de diseño de pavimentos flexibles que tome en cuenta una adecuada caracterización de las propiedades de los materiales, tránsito y clima.

Es importante mencionar que algunas de las metodologías de diseño de pavimentos empleadas actualmente en México son mayormente empíricas y limitadas, especialmente al momento de considerar el tránsito. Estas limitaciones en los métodos de diseño, permiten entender la necesidad de implementar un cambio en ellos que admitan una caracterización adecuada de las condiciones *in-situ*. En cambio, las metodologías empírico-mecanicistas presentan cambios importantes en el diseño de los pavimentos, principalmente en la forma en que se modelan las cargas del tránsito, las propiedades de los materiales y las condiciones climáticas.

Sin embargo, se requiere incorporar a las metodologías empírico-mecanicistas métodos probabilísticos. Esto permitirá identificar el comportamiento y analizar la variabilidad de las condiciones *in-situ*. Además, este tipo de metodologías no emplean técnicas probabilísticas que permitan realizar un pretratamiento estadístico para ordenar la información y eliminar los datos atípicos presentes en las variables de entrada. Por una parte, todos los métodos de diseño actuales introducen incertidumbre o sesgo debido a que se basan en el criterio del diseñador o proyectista. Por último, se requiere de la implementación de factores de seguridad al considerar condiciones *in-situ*.

Por lo tanto, este trabajo de investigación emplea la probabilidad para determinar la vida útil de un pavimento flexible; es decir, de un proceso analítico basado en la identificación y cuantificación de la probabilidad de falla del pavimento bajo sus diferentes condiciones *in-situ*. De acuerdo con lo anterior, es fundamental el diseño de una herramienta computacional de simulación que permita al diseñador de estructuras de pavimento flexible realizar los diseños considerando los siguientes aspectos:

1. Reducir la inversión tiempo-costo para el pre-procesamiento de la información.
2. Evaluar modelos climáticos que nos permitan determinar el efecto que puede producir el medio ambiente sobre las propiedades de los materiales.
3. Evaluar la variabilidad de las condiciones *in-situ*, mediante técnicas probabilísticas.
4. Visualizar y analizar el comportamiento estructural de las capas que constituyen la estructura del pavimento.
5. Determinar la vida útil en número de repeticiones de carga y en años.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo principal

Proponer e implementar una metodología de diseño de pavimentos flexibles mediante un análisis probabilístico para considerar la variabilidad del clima, tránsito y las propiedades mecánicas de los materiales.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Evaluar la variabilidad de las condiciones *in-situ* de los pavimentos mediante técnicas probabilísticas para identificar el comportamiento de los parámetros de entrada.
- Evaluar los datos del clima y las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en pavimentos, mediante modelos climáticos para determinar el efecto que puede producir el medio ambiente sobre las propiedades de los materiales.
- Realizar un análisis estocástico basado en la metodología empírico-mecanicista para determinar la vida útil de un pavimento flexible.
- Desarrollar una interfaz de usuario que permita visualizar y analizar el comportamiento estructural de las capas que constituyen la estructura del pavimento.

## 1.4 Propuesta de Solución

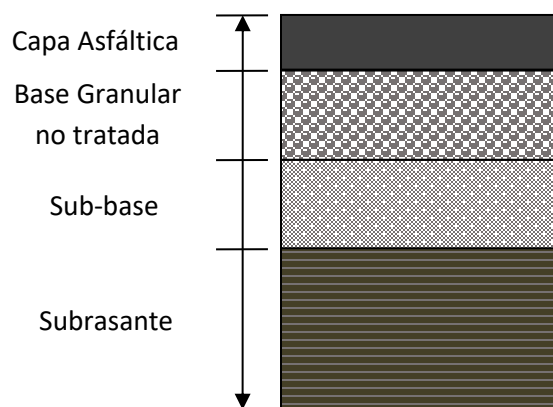
Este proyecto de investigación pretende mejorar la infraestructura vial del país, mediante el desarrollo y/o actualización de metodologías que nos ayuden a diseñar nuevos pavimentos flexibles en términos de durabilidad. El avance tecnológico que ha tenido el país en las últimas décadas, ha permitido realizar investigaciones respecto al diseño de pavimentos flexibles. Con base en dichas investigaciones, se propone el desarrollo de un método probabilístico basado en la metodología empírico-mecanicista para el diseño de pavimentos. Este método de diseño toma en cuenta las condiciones *in-situ* tales como las propiedades de los materiales, el tránsito y el clima. Por lo que, a partir de ensayos de mecánica de suelos en campo, se obtienen las características mecánicas de los materiales de banco que constituyen la estructura de un pavimento. Por una parte, con base en estas propiedades mecánicas de los materiales se determina el grado de saturación correspondiente al material. Por otra parte, de una base de datos climáticos se obtienen los valores correspondientes para la temperatura. Además, de la recolección de datos de tránsito se determinan los espectros de carga de los diferentes tipos de ejes y el TDPA.

La aplicación del método propuesto en este trabajo de investigación, permite evaluar de manera reiterada la respuesta que tiene el diseño de la estructura del pavimento bajo las diferentes condiciones *in-situ*. Para lo cual, se utiliza un método de simulación que permite analizar la variabilidad de la de las condiciones *in situ*. Con base en lo anterior se determinan los esfuerzos y deformaciones, se aplican las funciones de transferencia de desempeño del pavimento deducidas del método de la UNAM, IMT y otras metodologías de diseño. Esto con la finalidad de poder generar distribuciones para el desempeño de la estructura de pavimento analizada. A partir de lo anterior se predice el número de ciclos para llegar a la falla por fatiga de la carpeta asfáltica y por deformación permanente de las capas inferiores y para cada nivel de esfuerzo.

Si la propuesta cumple con los requisitos de diseño para su vida útil proyectada, se toma como diseño final. En caso contrario, es decir, que no satisfaga los requisitos de diseño, se procede a cambiar los tipos y/o propiedades de los materiales a utilizar en las capas que conforman la estructura de pavimento.

## 2 Marco Teórico

Uno de los retos que presenta el aumento del tránsito es garantizar la calidad de la infraestructura vial, lo que conllevará a que la red nacional de caminos ofrezca mejores servicios a la sociedad. Para ello se han enfatizado las investigaciones en el diseño de pavimentos, tanto rígidos como flexibles. Los pavimentos flexibles, son aquellos que su estructura se encuentra compuesta por capas superpuestas con distintas calidades en cada una de ellas (ver Figura 1). Estos pavimentos están diseñados para soportar las solicitaciones del tránsito y clima. Dichos pavimentos cuentan con una capa de carpeta asfáltica, es decir, una mezcla de agregado pétreo y material asfáltico, eventualmente con aditivos (AMAAC, 2013). Para llevar a cabo el diseño de pavimentos flexibles, se requiere analizar un cierto número de factores. La caracterización adecuada de cada uno de ellos es fundamental para poder concebir estructuras de pavimento que sean capaces de ofrecer altos desempeños en términos de durabilidad (Garnica, 2009). El término durabilidad, en pavimentos está relacionado con la capacidad de que la estructura pueda mantener sus condiciones de serviciabilidad durante el tiempo para el cual fue concebido. Existen diferentes métodos de diseño para pavimentos flexibles, los cuales se describen en las siguientes líneas.



**Figura 1.- Estructura de un Pavimento Flexible.**

### 2.1 Métodos Determinísticos y Probabilísticos de Diseño de Pavimentos

Existen dos métodos de diseño de pavimentos flexibles, los determinísticos y los probabilísticos. En los métodos determinísticos, cada factor de diseño tiene un valor fijo que se basa en el factor de seguridad y este a su vez está propuesto por el diseñador. De acuerdo a esto, el diseñador asigna



un valor más alto para los factores de diseño menos seguros o que tengan un mayor efecto al final del diseño. El empleo de estos métodos tradicionales basado en factores de seguridad da como resultado sobre diseños o sub diseños en términos de vida útil (Huang, 2004). Una aproximación más realista es el empleo de los métodos probabilísticos, en donde a cada factor de diseño se le asigna una media y una desviación estándar. En estos métodos, el factor de seguridad asignado a cada factor de diseño 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 diseño desempeñe su función prevista durante su vida útil proyectada (Huang, 2004).

Para comprender de mejor manera la diferencia entre los métodos probabilísticos y los métodos determinísticos, se tomará como ejemplo el muestreo.

Una diferencia esencial entre el muestreo de tipo probabilístico y el muestreo de tipo determinístico, es la selección de la muestra y con ello su representatividad. Por una parte, en el muestreo probabilístico la selección de la muestra es de manera aleatoria y en donde cada elemento de la población tiene una probabilidad conocida no nula de ser elegido. Con lo cual, cada elemento de la muestra representa un sector de la población y la muestra completa representa a toda la población. Por otra parte, en el muestreo determinístico la selección de la muestra no es aleatoria sino de tipo casual o fortuita. De ahí que con frecuencia se diga que es de tipo casual o fortuita (Pimienta Lastra, 2000).

### 2.1.1 Confiabilidad

Para llegar a cierto grado de certeza en los métodos de diseño de pavimentos flexibles, se emplea el parámetro de confiabilidad; con la finalidad de asegurar que las diferentes alternativas de la sección estructural del pavimento duren como mínimo el periodo de diseño (Rico, Téllez, & Garnica, 1998).

En México, métodos como el del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), utilizan el nivel de confianza definido en el método AASHTO-93. Para elegir el valor de este parámetro, el diseñador debe tomar en cuenta el tipo e importancia de carretera, procedimientos y control de construcción, tipo de conservación previsto y riesgo que se quiera aceptar (Corro, Magallanes, & Prado, 1981).

En la Guía de Diseño para Estructuras de Pavimentos (AASHTO, 1993), se recomiendan valores del parámetro de confiabilidad que van desde 50 hasta 99.99. Los niveles más altos corresponden a obras que estarán en uso intensivo, mientras que los valores más bajos corresponden a obras o caminos locales y secundarios como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1.- Valores de la Desviación Normal Estándar Correspondientes al Nivel de Confianza Seleccionado (AASHTO, 1993).**

Confiabilidad	Z <sub>R</sub>	Confiabilidad	Z <sub>R</sub>
50	0	92	-1.405
60	-0.253	94	-1.555
70	-0.524	95	-1.645
75	-0.674	96	-1.751
80	-0.841	97	-1.881
85	-1.037	98	-2.054
90	-1.282	99	-2.327

## 2.2 Métodos de Simulación

La simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a cabo experiencias con él, con la finalidad de aprender el comportamiento del sistema o de evaluar diversas estrategias para el funcionamiento del sistema. Los estudios de incertidumbre, sensibilidad e importancias sobre las variables de los modelos computacionales y sus respuestas se han vuelto una práctica relevante en los últimos años (Vitoriano, 2012). El objetivo de implementar métodos de simulación en este trabajo de investigación, es crear un modelo del sistema a partir de la observación. Esto permitirá identificar el comportamiento y analizar la variabilidad de las condiciones *in-situ*. A continuación, se describen los métodos implementados en este trabajo de investigación.

### 2.2.1 Método de Monte Carlo

El método de muestreo de Monte Carlo, es un método de simulación que consiste en elegir números aleatorios que son asociados a una función de distribución de probabilidad con parámetros identificados, para luego obtener los valores correspondientes de dicha variable que constituyen la muestra (Martins, Ferreira, Pardal, & Morano, 2012). La función de distribución de probabilidad, debe presentar una forma semejante a la distribución de los elementos de la muestra. Esta técnica requiere un elevado número de muestras para conseguir una adecuada representatividad de la función de distribución de la variable (Núñez Mc Leod & Barón, 1999).

## 2.3 Metodología Empírico-Mecanicista de Diseño de Pavimentos Flexibles

Este método toma en cuenta cómo los estados de esfuerzo y deformación, presentes en las capas que conforman la estructura del pavimento, influyen en el comportamiento del mismo, a diferencia de los empíricos (Rondón & Reyes, 2007). Este tipo de metodologías requieren una modelación previa tanto de la estructura del pavimento como de las cargas. Debido al gran desarrollo de los programas de computación, muchas de las teorías de análisis pueden aplicarse a las condiciones prácticas. Para la determinación de estos esfuerzos y deformaciones se emplean programas, a los cuales se les introducen datos como: la carga, la presión de contacto, las propiedades mecánicas de los materiales (Módulo de elasticidad, relación de Poisson) y el espesor de las capas, para analizar los resultados y compararlos con los que requiere el pavimento para la vida útil proyectada. Esto a prueba y error (aumentando o disminuyendo los espesores de las capas) se obtienen las dimensiones de las capas que conformarán la estructura del pavimento.

La principal desventaja de la metodología Empírico-Mecanicista radica en que el cálculo de los estados de esfuerzo y deformación, que se realiza por lo general suponiendo que el pavimento flexible es un sistema *multicapa elástico lineal*, compuesto por tres capas; la subrasante, la capa granular no tratada y la capa asfáltica, (Figura 2). Este comportamiento elástico lo supone de manera simplista y lo justifica diciendo que bajo algún ciclo de carga individual la deformación permanente será muy baja comparada con la deformación resiliente. Los parámetros elásticos se obtienen en laboratorios por ensayos o retro cálculos de ensayos *in situ* (empleando por ejemplo en laboratorio la prueba triaxial cíclica y en campo un deflectómetro de impacto “FallingWDeflectometers” – FWD) (Rondón & Reyes, 2007).

A pesar de ser una metodología diferente a las empíricas, ambas presentan connotaciones similares. Por ejemplo, el criterio de diseño en los métodos analíticos es el mismo: el pavimento falla por acumulación de deformación a tensión en la zona inferior de la capa asfáltica debido a fatiga (ciclos de carga) y por exceso de deformación vertical en la superficie de la capa de subrasante. Es decir, no tienen en cuenta el efecto que puede tener la acumulación de la deformación en las capas de base y sub-base granulares no tratadas (Rondón & Reyes, 2007).

Por un lado, las ecuaciones elásticas lineales no toman en cuenta el comportamiento viscoso de las mezclas asfálticas (que dependen de la velocidad de aplicación de carga y temperatura). Por otro lado, para los materiales granulares no tratados de bases y sub-bases su comportamiento es inelástico (deformaciones resilientes y permanentes) no lineal (rigidez dependiente del nivel de esfuerzo aplicado) para los niveles de esfuerzo a los que se somete un pavimento flexible. Además, dependiendo del material de subrasante, el comportamiento puede ser viscoso, como es el caso de muchas arcillas (Rondón & Reyes, 2007).

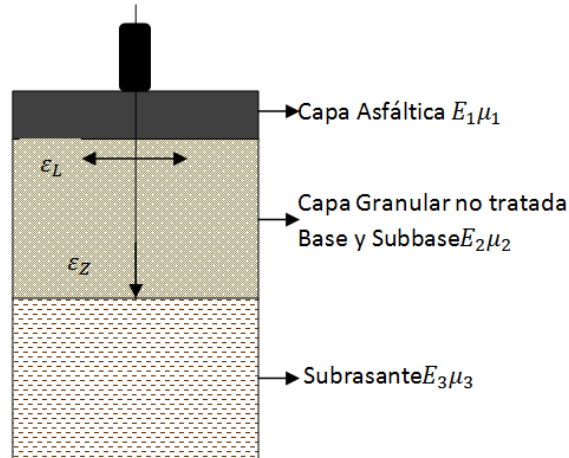


Figura 2.- Sistema Multicapa Elástico para el Diseño de Pavimentos Flexibles.

Otras desventajas de emplear esta metodología son:

- Supone que los materiales de cada capa son isotrópicos y homogéneos.
- Los programas analíticos no toman en cuenta las diferentes geometrías que pueden presentar las estructuras de pavimento (por ejemplo: suponen extensión infinita de las capas en sentido horizontal) y la carga es estática.
- En la mayoría de los casos los programas no toman en cuenta los efectos del medio ambiente sobre las propiedades mecánicas de los materiales utilizados.
- Cuando se emplean ecuaciones elásticas se generan valores no reales de esfuerzos de tensión en las capas granulares (elásticamente eso no es posible), especialmente en pavimentos con capas asfálticas delgada.

En la Figura 3 se puede apreciar de mejor manera la metodología general para el diseño de pavimentos flexibles. Se parte de la suposición de que se conocen los materiales utilizados para la estructura del pavimento y los espesores del mismo están sujetos a iteraciones de diseño. Si los espesores propuestos no satisfacen los requisitos de diseño, se procede a cambiar los tipos y propiedades de los materiales a utilizar (Rico, Téllez, & Garnica, 1998).

El primer paso en la metodología del diagrama representado en la Figura 3, implica la suposición de una configuración inicial del pavimento que incluye el número de capas, su espesor y el tipo de materiales a utilizar. Posteriormente se implementan modelos climáticos que parten de la siguiente premisa: si la temperatura y los contenidos de agua en el pavimento varían considerablemente durante el año, será necesario considerar diferentes valores para los módulos de resiliencia de cada una de las capas que conforman el pavimento en función de la época del año (Rico, Téllez, & Garnica, 1998).

El tránsito debe subdividirse en un cierto número de grupos, cada uno con diferentes configuraciones, pesos y número de repeticiones. El peso, la configuración, separación entre ejes, el radio y la presión de contacto son variables utilizadas en los modelos estructurales. Mientras que el número de repeticiones se usa en los modelos de deterioro (Rico, Téllez, & Garnica, 1998).

Una vez que se tiene los parámetros de entrada, se procede a determinar la respuesta del pavimento ante una sollicitación está dada en términos de esfuerzos, deformaciones, y deflexiones, y es obtenida a partir de los modelos estructurales. En general, se acepta que los cuatro indicadores más significativos del comportamiento de un pavimento flexible son la deflexión superficial, la deformación a la tensión en la carpeta asfáltica, y los esfuerzos y deformaciones de compresión en la subrasante (Rico, Téllez, & Garnica, 1998).

La deflexión superficial y la máxima deformación a la tensión en el plano inferior de la carpeta asfáltica están directamente relacionadas con el agrietamiento del concreto asfáltico por fatiga. Los esfuerzos y deformaciones de compresión en la subrasante se relacionan con las deformaciones permanentes (roderas) en el pavimento.

A partir de los esfuerzos y deformaciones, se procede a determinar el deterioro causado por la sollicitación de las variables de entrada mediante la aplicación de modelos de deterioro. Los modelos de deterioro suelen incluir el agrietamiento debido a la fatiga y las deformaciones permanentes. En su caso, pueden incluir también la rugosidad. Si la confiabilidad para un cierto deterioro es menor que el nivel mínimo requerido, la configuración del pavimento deberá modificarse y comenzar una nueva iteración, hasta la obtención del nivel requerido.

Los modelos de deterioro son funciones de transferencia que relacionan la respuesta estructural de un sistema con varios tipos de deterioro. Estos modelos son el talón de Aquiles de los métodos de diseño mecanicistas, ya que requieren una extensiva calibración y verificación en campo para ser confiables (Rico, Téllez, & Garnica, 1998).

Por último, el diseño final se obtiene cuando la configuración del pavimento, es decir la geometría y las propiedades de los materiales, satisfacen los requisitos de confiabilidad para cada tipo de deterioro.

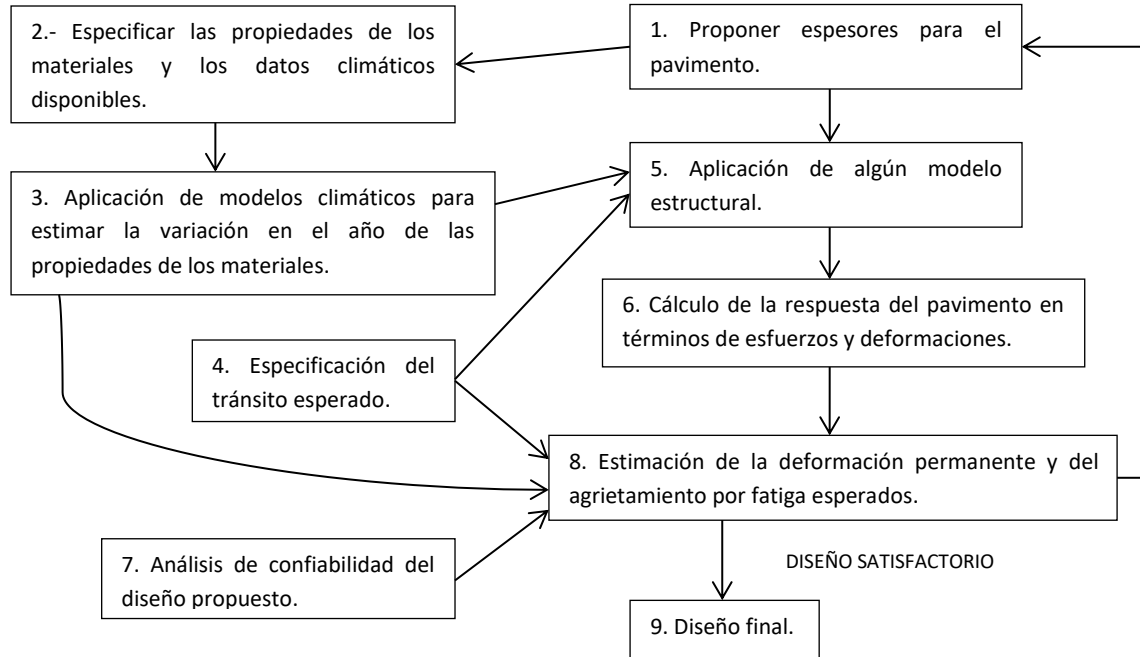


Figura 3.- Metodología General de Diseño de Pavimentos Flexibles (Rico Rodríguez, Téllez Gutiérrez, & Garnica Anguas, 1998).

## 2.4 Parámetros de Entrada Requeridos para el Análisis Probabilístico

Los parámetros de entrada que intervienen directamente en el diseño de pavimentos flexibles son numerosos y guardan cierta interacción entre sí. Es por ello que, un proyecto adecuado debe analizar el problema desde un punto de vista general. Las variables de diseño que se emplean para la aplicación de la metodología descrita en el capítulo 4 son tres:

1. Propiedades de los Materiales.
2. Clima
3. Espectros de Carga.

A continuación, se describe la procedencia de las variables de entrada y su determinación se respalda por referencias bibliográficas.

### 2.4.1 Módulo Dinámico de la Carpeta Asfáltica

La resistencia de la mezcla asfáltica se puede obtener en términos del módulo dinámico  $M_D$ , que está en función de las propiedades mecánicas del asfalto y del agregado mineral. La temperatura tiene un efecto importante en el  $M_D$  debido al contenido de asfalto de la mezcla. Por tanto, el concreto asfáltico sometido a temperaturas elevadas será más susceptible a presentar

deformaciones permanentes, mientras que para bajas temperaturas se pueden presentar fisuraciones térmicas. Por lo anterior, es necesario tener una buena selección del asfalto de acuerdo a lo que estipula la Asociación Mexicana del Asfalto A.C. (AMAAC, 2013).

#### 2.4.1.1 Selección del Asfalto Grado PG

Las temperaturas de diseño del sistema de clasificación de asfaltos Superpave se determinaron en función de los mecanismos de falla más importantes: deformaciones permanentes, fisura debido a la fatiga de la carpeta asfáltica y fisuras térmicas por efecto del congelamiento.

Con lo anterior, el cemento asfáltico de Grado PG se debe seleccionar en función de las temperaturas máximas y mínimas que se esperan en el lugar de aplicación de acuerdo con lo que estipula el protocolo (AMAAC, 2013).

En ocasiones no es posible tomar la temperatura directamente en el pavimento, por lo que de acuerdo con (AMAAC, 2013) se propone determinarla a 20 milímetros de profundidad con respecto a la superficie de la carpeta.

Además, se deben revisar las temperaturas máximas que se presentan durante los 7 días más calurosos del año, durante varios años. Con estos datos, se establecerá el promedio estadístico de los 7 días reportados en el sitio donde se construirá la estructura del pavimento. Para realizar el ajuste por temperatura, se hará uso de la ecuación de Superpave (Ecuación **(1)**).

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

en dónde;

$T_{(pav)}$  = 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.

Se tomará la latitud en el kilometraje inicial y en el kilometraje final, la temperatura que resulte más alta al utilizar ambas latitudes es la que se tomará para buscar elegir el valor máximo del grado PG para un buen desempeño del asfalto.

Para el caso de temperaturas bajas se considerará como crítica la menor temperatura alcanzada durante el año y se tomará el promedio de la temperatura mínima registrada en años anteriores. El valor de corrección por temperatura mínima se calcula con la siguiente ecuación:

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

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.

La temperatura máxima del Grado PG seleccionado de acuerdo con el clima que se presenta en la zona de estudio, se debe ajustar además por la intensidad de tránsito esperada en términos del número de ejes equivalentes de 8.2 Ton acumulados durante la vida de servicio del pavimento y por velocidad de operación, de acuerdo con la norma N-CTM-4-05-004/05 "Calidad de Materiales Asfálticos Grado PG" como se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2.- Ajuste del Grado PG Seleccionado por Clima de acuerdo con la Intensidad de Tránsito Esperada y con la Velocidad de Operación (N-CTM-4-05-004/05 ).**

Intensidad del Tránsito ( $\Sigma L_{10}$ )	Grado PG Seleccionado por Clima	Ajuste por Intensidad de Tránsito	Ajuste por Velocidad Lenta (entre 10 y 30 km/hr)	Ajuste por Tránsito Detenido
$\Sigma L_{10} < 10^6$	PG 64	PG 64	PG 70	PG 76
	PG 70	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 76	PG 76	PG 82	PG 88
$10^6 \leq \Sigma L_{10} \leq 10^7$	PG 64	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 70	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 76	PG 82	PG 88	PG 88
$\Sigma L_{10} > 10^7$	PG 64	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 70	PG 82	PG 88	PG 88
	PG 76	PG 88	PG 88	PG 88

## 2.4.2 Módulo Resiliente de las Capas Suelo

La mejor manera de caracterizar los materiales que constituyen las capas de suelos que componen la estructura del pavimento flexible es en términos de Módulo de Resiliencia  $M_R$ . Como se ha



mencionado, en una estructura de pavimento, la temperatura y el contenido de agua son dos variables medioambientales que pueden afectar significativamente el módulo resiliente de las capas de suelo de la estructura de pavimento. Cuanto mayor sea el contenido de agua, el módulo de resiliencia será menor. Sin embargo, el contenido de agua afecta de dos maneras diferentes a las capas que conforman 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.

#### 2.4.2.1 Módulo de Resiliencia en Función del Contenido de agua del Suelo

El dato requerido para definir la rigidez de los materiales compactados es el valor de  $M_R$ , el cual es determinado cerca del contenido de agua óptimo y la densidad seca máxima. El valor del  $M_R$  en laboratorio se determina en las condiciones óptimas. Por esta razón, el valor óptimo será la condición que se toma como referencia. Además, de que en la práctica es común que los constructores compacten un poco por encima del valor mínimo requerido. Esto nos da una aproximación a la condición óptima de referencia.

Por lo anterior y con base en la Guía AASHTO 2004, se considerará 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 respectiva. Así que, el valor de  $S_{equil}$  depende del clima de la zona.

#### 2.4.3 Espectros de Carga y Daño para Diseño de Pavimentos

Existe un gran número de factores que se consideran actualmente para el análisis estructural y diseño de pavimentos, uno de los más importantes es el tránsito vehicular. La caracterización adecuada de este parámetro de diseño es sumamente importante para proyectar estructuras de pavimento que sean capaces de ofrecer altos desempeños en términos de durabilidad. Este factor es de gran importancia debido a que en vías de alto y muy alto tránsito vehicular crece de manera exponencial, y en donde, un gran porcentaje de los vehículos son de carga y muy pesados.

En México, el interés se centra en cinco tipos de vehículos de carga, cuya configuración y pesos legales se indican en la Figura 4. De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana de Pesos y Dimensiones del 2017 los pesos máximos permitidos para los ejes sencillos duales, en tándem y en tridem son 11, 18 y 23.5 toneladas, respectivamente (NOM-012-SCT-2-017).

##### 2.4.3.1 Espectros de Carga

Para fines de diseño, rehabilitación, modernización, reconstrucción, preservación y operación de carreteras, la mejor manera de caracterizar el tránsito vehicular es en términos de espectros de carga para cada uno de los diferentes tipos de ejes. Para obtener un espectro de carga se necesita conocer los pesos por ejes para un sitio específico. Los espectros de carga se definen como la

relación entre el número de ejes con cierto rango de carga y el número total de ese tipo de eje, expresado en porcentaje (Garnica, 2009).

Se utilizan estaciones de pesaje para obtener los pesos de los distintos ejes de los vehículos. Estas estaciones de pesaje están compuestas básicamente por sensores piezoeléctricos de alta precisión, cableado y consola de registro (ver Figura 5). Se realiza una calibración inicial con un vehículo de carga de peso conocido que permite definir los factores de ajuste dinámicos. Con las tecnologías más recientes, esas estaciones son muy fáciles de operar y registran en tiempo real la configuración y pesos de cada eje de los vehículos de carga circulando a velocidades de operación (Garnica, 2009).

La Figura 6, presenta un ejemplo de los tipos de espectros de carga para el eje sencillo, tándem y tridem de la Carretera Libre Portezuelo-Palmillas. Estos datos fueron tomados en 2003 por el Instituto Mexicano del Transporte.

Con base en lo anterior, existe una manera de valorar y determinar el daño causado por las repeticiones de carga sobre un pavimento flexible. El cálculo se realiza a partir del conocimiento de los espectros de carga, lo que se define como espectro de daño.






TIPO	Configuración del Vehículo y Peso por Eje (Ton)					PBV (Ton)
<b>C2 Clase 5</b>						
NOM 1995	6.5	11				17.5
NOM 2008	6.5	11				17.5
<b>C3 Clase 6</b>						
NOM 1995	6.5	19.5				26
NOM 2008	6.5	18				24.5
<b>T3-S2 Clase 7</b>						
NOM 1995	6.5	19.5	18			44
NOM 2008	6.5	18	17			41.5
<b>T3-S3 Clase 10</b>						
NOM 1995	6.5	19.5	22.5			48.5
NOM 2008	6.5	18	23.5			48
<b>T3-S2-R4 Clase 13</b>						
NOM 1995	6.5	19.5	18	18	18	66.5
NOM 2008	6.5	18	17	17	17	66.5

Figura 4.- Configuración y Pesos Legales de Vehículos de Carga en México.



Figura 5.- Cableado y Sensores Piezoeléctricos.

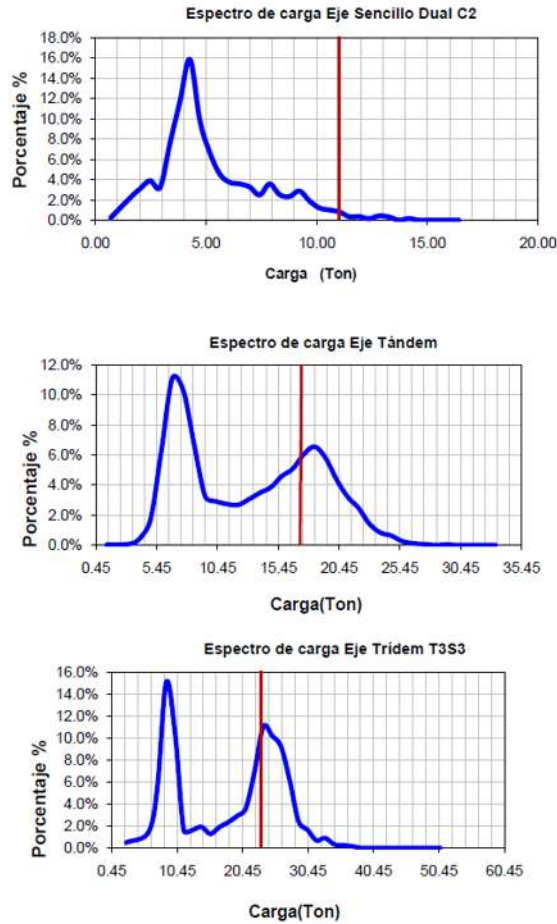


Figura 6.- Espectros de Carga de la Carretera Libre Portezuelo-Palmillas (2003), (Garnica, 2009).

#### 2.4.3.2 Espectros de Daño

Para obtener un espectro de daño, se generaliza la ley de Miner para cada tipo de eje ( $i$ ) y para cada nivel de carga ( $j$ ). A partir de ello, se obtiene el inverso del número de repeticiones admisibles,  $N$ , para limitar el progreso de un cierto tipo de deterioro, ver ecuación (3). El daño total se calcula mediante la ecuación (4)

$$D_i = \frac{1}{N_f} \quad (3)$$

$$D_{total} = \sum_{ij=1}^{MC} D_{ij} \quad (4)$$

En la Figura 9 se representa esquemáticamente un análisis estocástico basado en la metodología empírico-mecanicista. Mediante el empleo de esta metodología se pueden modelar las propiedades de los materiales, variabilidad de los espesores de las capas y los distintos espectros de carga. Los

parámetros de entrada se modelan mediante el método de simulación Monte Carlo y las respuestas críticas del pavimento se determinan a través de un análisis multicapa elástico en la parte inferior de la carpeta asfáltica y en la parte superior de la subrasante, para predecir el agrietamiento por fatiga y la deformación permanente respectivamente.

Con base en lo anterior se aplican funciones de transferencia de desempeño del pavimento de tipo generales. Esto con la finalidad de poder generar distribuciones para el desempeño de la estructura de pavimento analizada. A partir de lo anterior se predice el número de ciclos para llegar a la falla por fatiga de la carpeta asfáltica y por deformación permanente de las capas inferiores y para cada nivel de esfuerzo.

Como se muestra en la Figura 9, el número de repeticiones admisibles está ligado con los esfuerzos y deformaciones máximos que se presentan en puntos críticos de la sección estructural de un pavimento, determinados a través de los modelos de respuesta. Ahora, el coeficiente de Daño ( $D_i$ ) es asociado a un cierto tipo de deterioro en el pavimento, como los que se muestran en la Figura 7 y Figura 8. Para agrietamiento por fatiga se toma, por ejemplo, la deformación unitaria de tensión máxima,  $\epsilon_t$ , en la fibra inferior de la carpeta asfáltica y, para la deformación permanente de las capas inferiores, la deformación unitaria de compresión máxima,  $\epsilon_c$ , en la parte superior de las terracerías.



Figura 7.- Falla por Deformación Permanente.



Figura 8.- Falla por Fatiga de la Carpeta Asfáltica.

Actualmente, se han realizado distintas investigaciones como resultado de la necesidad de relacionar la forma en que los espectros de carga desarrollados en investigaciones previas, pueden ayudar a comprender la respuesta estructural de los pavimentos. Estas investigaciones muestran un análisis de la forma en que cada una de las configuraciones de los tipos de ejes influyen en las estructuras de pavimentos, con la finalidad de observar de manera más realista el daño que pueden producir sobre las carreteras (Dawson, 2008), (Hwang & Han, 1985), (Leiva Padilla, Allen Monge, Badilla Vargas, & Loría Salazar, 2013), (Sun & Ronald Hudson, 2005), (Sun, Ronald Hudson, P. E., F. ASCE, & Zhang, 2003).

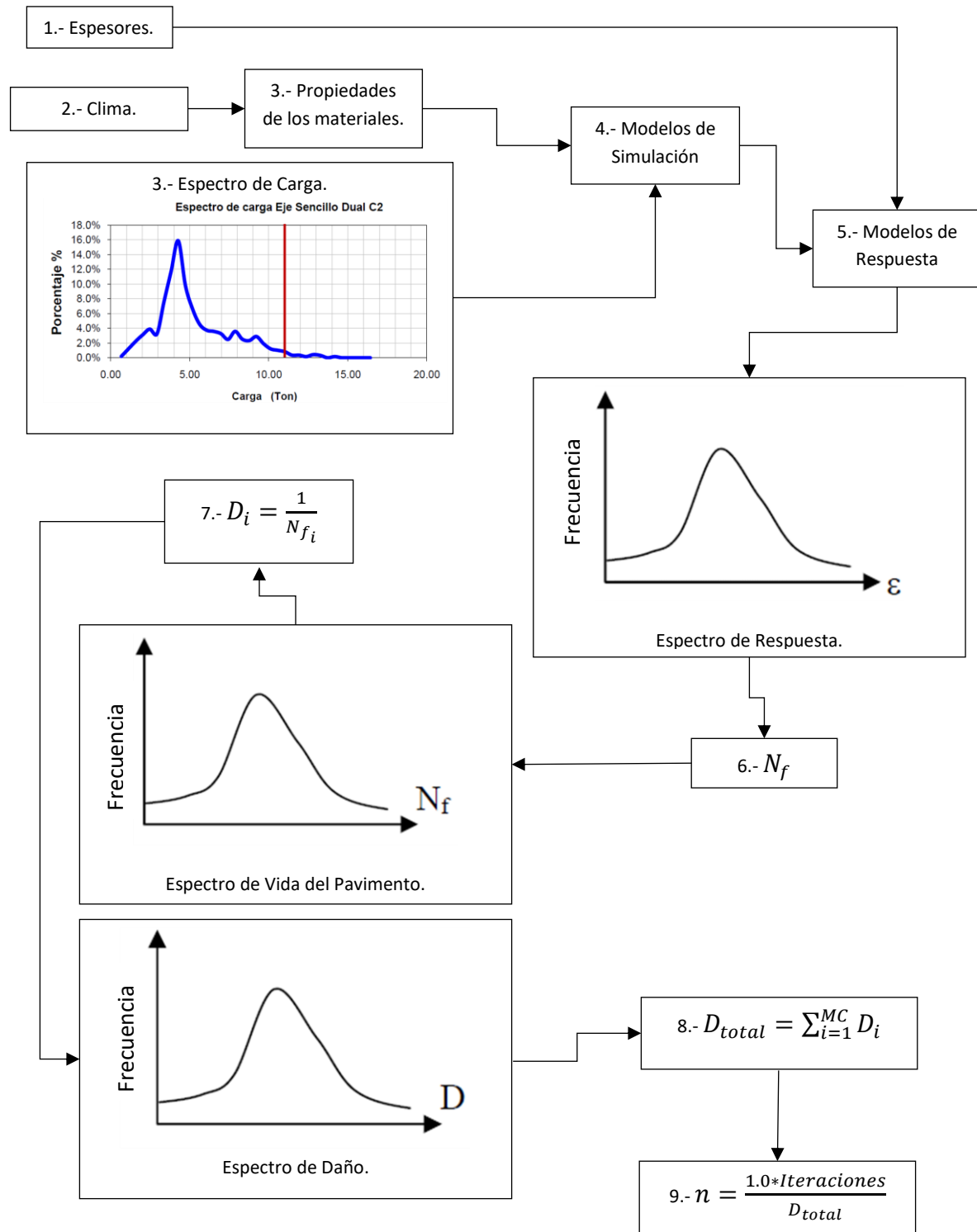


Figura 9.- Análisis Estocástico Basado en la Metodología Empírico Mecanicista (Turochy, Timm, & Tisdale, 2005).

## 3 Estado del Arte

En este capítulo presentamos la revisión del estado del arte. Mencionamos los trabajos más importantes que se han desarrollado para el diseño de los pavimentos flexibles. Este capítulo está subdividido en 2 secciones. La primera sección corresponde a los métodos de diseño determinísticos. Mientras que en la segunda sección se presenta una clasificación de los métodos de diseño probabilísticos.

### 3.1 Métodos Determinísticos

Existe un gran número de métodos determinísticos para el diseño de pavimentos flexibles, basados en condiciones *in-situ* como las propiedades de los materiales, el tránsito vehicular y el clima. Estos métodos pueden considerar una o varias condiciones para el diseño de pavimentos flexibles, denominándose los últimos como híbridos. Sin embargo, estos métodos de diseño presentan varias limitaciones. Por una parte, uno de los principales inconvenientes es la caracterización del tránsito en términos de ejes equivalentes sencillos 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 las estructuras de pavimentos y determinar los daños que estas producen a dichas estructuras. Por otra parte, no analiza las condiciones climáticas de manera adecuada ya que no emplea modelos climáticos. Otra limitante que aparece en este tipo de métodos es que no todos los métodos realizan un análisis de esfuerzos y deformaciones, sino que propone coeficientes de resistencia estructural para obtener los espesores equivalentes como en el método de la UNAM (Corro, Magallanes, & Prado, 1981). A continuación, debido al enfoque de este trabajo de investigación, se describen únicamente los métodos determinísticos híbridos.

#### 3.1.1 Métodos Determinísticos Híbridos

Los métodos determinísticos para el diseño de pavimentos flexibles son modelos matemáticos de diseño. En donde a cada variable de entrada se le asigna un factor de seguridad y su valor depende del criterio del diseñador (Huang, 2004). Estos métodos no consideran enfoques estocásticos o estadísticos y por lo general, este tipo de métodos son de aplicación rápida y sencilla. A continuación, se describen algunos de los métodos determinísticos híbridos que existen para el diseño de pavimentos flexibles.

##### 3.1.1.1 Método del Instituto de Ingeniería de la UNAM

En el Instituto de Ingeniería de la UNAM, (Corro, Magallanes, & Prado, 1981) desarrollaron un método de diseño de pavimento que considera condiciones *in-situ* como propiedades de los materiales, características del tránsito y clima. Las variables que intervienen en el diseño de un pavimento flexible son numerosas y tienen interacción entre sí. Ellos proponen un método que permite analizar la estructura del pavimento y las terracerías. El parámetro de resistencia que se adopta es el Valor Relativo de Soporte (VRS), ya que es su momento fue el criterio más difundido. La hipótesis de diseño considera, que la mejor estructura de pavimento es aquella que tiene una resistencia relativa uniforme en todas sus capas, y llega a la falla funcional cuando ha soportado el



número acumulado de aplicaciones de carga equivalente especificadas para la vida de proyecto. Si la resistencia relativa no es uniforme en las diferentes capas, la capa con menor resistencia relativa determina la vida de servicio del pavimento.

La resistencia que ofrece una masa de suelo a ser deformada está definida, como se comentó en términos de VRS, el cual depende del tipo de suelo, densidad y contenido de humedad. Su estimación requiere conocer las características climatológicas y geotécnicas, estructuración y diseño geométrico de la carretera, y tener experiencia regional suficientemente documentada. La UNAM propone determinar el contenido de agua mediante el criterio del Laboratorio de investigación del Transporte de Gran Bretaña, que es está vigente en la actualidad (Au & JL, 1993).

Otro aspecto importante que incluye este método, es el término de confiabilidad para aumentar el grado de certeza de que el diseño desempeñará su función prevista.

Finalmente, este método presenta un procedimiento sencillo para obtener los espesores equivalentes. A partir de nomogramas que están en función del nivel de confianza seleccionado, el VRS de la capa, y el tránsito acumulado de ejes sencillos de 8.2 toneladas para el carril de proyecto. Con lo anterior, el diseñador podrá obtener los espesores equivalentes para cada capa a las profundidades  $Z_N$ , tomando en cuenta coeficientes de resistencia estructural  $a_i$ .

$a_1 D_1$  = carpeta,  $D_1$  espesor en cm,  $a_1$  coeficiente de equivalencia.

$a_2 D_2$  = base,  $D_2$  espesor en cm,  $a_2$  coeficiente de equivalencia.

$a_n D_n$  = capa,  $D_n$  espesor en cm,  $a_n$  coeficiente de equivalencia.

Con lo anterior, el proyectista estará en posibilidades de determinar el espesor final de cada capa de la sección estructural del pavimento diseñado, interviniendo para ello los diferentes criterios que adopte para una mejor estructuración de la sección carretera, tomando en cuenta ciertos arreglos de capas, ciertas clases de materiales y mínimos espesores que se tienen especificados por la dependencia o autoridad responsable.

### 3.1.1.2 Método del Instituto del Asfalto de EUA

En Rico, Téllez & Garnica (1998), se describe el Método de Diseño del Instituto del Asfalto de los Estados Unidos. El procedimiento allí descrito es utilizado para el diseño de estructuras de pavimentos flexibles, donde la subrasante es la capa más baja y esta se considera semiinfinita en ambos sentidos. En este método el tránsito es analizado en términos de ejes equivalentes sencillos de 8.2 toneladas. El método describe que la estructura del pavimento se considera como un sistema elástico multicapa. En donde la resistencia de cada capa está caracterizada por su módulo de elasticidad. Si la capa superficial es una mezcla asfáltica, se considera el módulo dinámico y módulos de resiliencia si son materiales granulares o suelos sin tratar.

Para simular los efectos de la temperatura en las propiedades de los materiales y su variabilidad a través del año, se seleccionaron valores apropiados de módulos dinámicos y módulos de resiliencia

después de un estudio de la relación módulo-temperatura y propiedades del asfalto. Este último para el caso en el que la capa superficial sea una mezcla asfáltica.

### 3.1.1.3 Método AASHTO 1993 para el Diseño de la Sección Estructural de Pavimentos

En la Guía AASHTO 93 (1993) se desarrolló un método de diseño de secciones estructurales de pavimentos flexibles, que describe que la superficie de rodamiento será resuelta únicamente con concreto asfáltico y tratamientos superficiales. De acuerdo a lo anterior, el método asume que dichas estructuras soportarán niveles significativos de tránsito, dejando de lado pavimentos para tránsitos ligeros.

El diseño se basa en la identificación de un número estructural (SN) para el pavimento flexible que pueda soportar el nivel de carga que sea solicitado. Para determinar el tránsito, el método contempla los ejes equivalentes sencillos de 8.2 toneladas. Otro aspecto que es importante resaltar, es que toma en cuenta un nivel de confiabilidad para garantizar cierto grado de certeza en el diseño de la sección estructural.

En este método, se considera que para caracterizar adecuadamente los materiales, el parámetro de resistencia del suelo debe darse en términos de módulo resiliente. Dicho parámetro se debe obtener a partir de pruebas de laboratorio con muestras representativas de humedad y esfuerzo, para simular su variación durante el año.

### 3.1.1.4 Catálogo Español de Secciones de Firme

En España (Ministro de Obras Públicas y Urbanismo, 2003) se elaboró una norma que establece los criterios básicos a considerar en el diseño de las estructuras de pavimentos para carreteras de nueva construcción. Presenta una metodología que facilita y simplifica la labor del ingeniero proyectista, acompañada de un catálogo de secciones estructurales comprobadas mediante métodos analíticos actuales. La estructura del pavimento, deberá adecuarse, entre otros factores, a la acción prevista del tránsito vehicular, fundamentalmente en el más pesado, durante la vida útil del pavimento. Por ello, depende en primer lugar de la intensidad media diaria de vehículos pesados.

Proporciona trece alternativas de solución para cinco tránsitos diferentes, tres categorías de subrasante y ocho clases de materiales, para ser utilizadas en las capas de la sección estructural del pavimento. Este catálogo provee al usuario una gama del orden de quinientas secciones de pavimentos (SCOI, 2007).

Esta metodología se basa, específicamente en la relación que existe entre la intensidad del tráfico pesado y niveles de deterioro admisibles al final de la vida útil del pavimento para determinar cada tipo de sección estructural. El catálogo de secciones se prepara con base en combinaciones analíticas, estas toman en cuenta tanto la parte técnica como la económica, para dar como resultado la sección tipo más adecuadas para la categoría de tránsito y terraplén seleccionado.

### 3.1.1.5 Metodología Australiana para el Diseño de Pavimentos Flexibles

En Australia desarrollaron un método de diseño que se basa en el análisis estructural de una estructura de pavimento multicapa, sujeto a cargas normales de tránsito (Urbaéz & Erskine, 2011). En la nueva guía, el modelo de respuesta del pavimento se considera como un eje estándar completo en el cálculo de los esfuerzos críticos, y no como un eje medio como se consideraba en las guías antiguas.

El proceso inicia con la entrada de datos como son las propiedades mecánicas de los materiales, tránsito, temperatura máxima y mínima, entre otras. Se analiza la estructura del pavimento para determinar el nivel de tránsito permitido de manera determinística, y luego se compara el tránsito solicitante con el permitido, para obtener el diseño final. Para la selección de la configuración de la estructura del pavimento se realiza mediante tablas. En estas se revisan ciertos aspectos como el tipo de camino, la intensidad de cargas, entre otras.

De acuerdo con lo que se describe, la metodología se vuelve iterativa hasta encontrar una solución óptima, en este momento, las variaciones que se producen son producto principalmente de la modificación de los espesores de las capas del pavimento.

En cuanto al modelo lineal elástico de respuesta del pavimento, considera que se tiene contribución por parte de ejes equivalentes en el cálculo de esfuerzos y deformaciones críticas, por medio de la ecuación general de diseño que calcula el daño acumulado inducido por las cargas de tránsito. Para determinar si el diseño es factible se emplea el factor de daño acumulado.

### 3.1.1.6 Método UMICH-PAV

La investigación realizada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (Coria, Chávez, Alarcón, & Arreygue, 2012) parte de la metodología empírico-mecanicista para el desarrollo de un método para el diseño, análisis estructural multicapa y sensibilidad paramétrica de pavimentos flexibles. En el trabajo, se toma como base esta metodología, e incorporan distintos modelos de deterioro de fatiga de la carpeta y de deformación permanente; como las del propio Instituto de Ingeniería de la UNAM y se realizan comparaciones con otras metodologías. Además, para determinar la respuesta del pavimento implementa un análisis de esfuerzos y deformaciones presentes en las capas del pavimento mediante el método de Odemark-Boussinesq. Es importante mencionar que este método considera las características elásticas de los materiales utilizados, para el caso de carpetas asfálticas el módulo dinámico mientras que para las capas de suelo el módulo resiliente.

### 3.1.1.7 Catálogo de Secciones Estructurales de Pavimentos para Carreteras de la República Mexicana

Dada la necesidad de construir carreteras con estructuras de pavimentos de calidad, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 2013) elaboró un catálogo de secciones estructurales dividido en 3 etapas importantes. Con él se busca tener un guía que ayude a recomendar y verificar, que las estructuras de pavimentos propuestas en los proyectos nuevos y rehabilitación de los existentes, cumplan con las condiciones necesarios para tener un buen desempeño. El catálogo está

elaborado para los climas, tránsito vehicular y materiales más comunes en la República Mexicana por ser los factores más importantes para el diseño de pavimentos.

Para poder llevar a cabo lo anterior, la República Mexicana se regionalizó de acuerdo al tipo de materiales que componen el terreno natural, las temperaturas máximas y mínimas, y la precipitación pluvial máxima (SCT, 2013). Esto es de vital importancia debido a que fueron los datos de los cuales partieron los diseños de las secciones estructurales de pavimentos que se presentan en dicho catálogo. Está basado en dos métodos de diseño de pavimentos flexibles, por un lado, el método de la UNAM y por otro lado el método de AASHTO-93; es decir, se basó en los parámetros que solicitan estos dos métodos.

Los parámetros de cálculo como el módulo resiliente de mezclas asfálticas y suelos, se determinaron a partir de pruebas de laboratorio en las muestras de los materiales extraídos de un muestreo efectuado tanto en bancos de materiales, como en los pavimentos existentes en las carreteras de la República Mexicana. Para el caso del tránsito vehicular, se realizó un análisis de los datos de tránsito contenido en los libros “Datos Viales” que publica la Dirección General de Servicios Técnicos, con el objeto de caracterizar este factor en rangos de tránsito de ejes sencillos de 8.2 toneladas.

## 3.2 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. Por lo tanto, 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 hasta alcanzar un nivel mínimo de serviciabilidad especificada y no desde una perspectiva determinista. A pesar de analizar de manera probabilística el comportamiento estructural del pavimento, estos tipos de métodos tienen el inconveniente de que no implementan completamente la metodología empírico-mecanicista. Pues aún no consideran modelos climáticos para el diseño de pavimentos. Existen distintos métodos probabilísticos de diseño de pavimentos flexibles, a continuación, se describen los más importantes.

### 3.2.1 Métodos Probabilísticos que Consideran Espectros de Carga

Turochy propone un análisis estocástico basado en la metodología empírico-mecanicista (Turochy, Timm, & Tisdale, 2005). Con fines prácticos, se hizo uso del software de diseño empírico-mecanicista PerRoad. Este software permite analizar la variabilidad de las propiedades de los materiales. Sin embargo, se introdujeron de manera determinística y sólo se analiza la variabilidad de los espectros

de carga del tránsito vehicular. Para analizar la variabilidad de los espectros de carga del tránsito y determinar su comportamiento, se utilizó el modelo de simulación de Montecarlo. En este análisis para determinar la respuesta del pavimento se implementa un análisis de esfuerzos y deformaciones presentes en las capas del pavimento mediante el método de WESLEA, que permite analizar la respuesta del pavimento elástico en la parte inferior de la carpeta asfáltica y en la fibra superior de la capa de subrasante, para predecir el agrietamiento por fatiga y la deformación permanente. Para la determinación del número de repeticiones de carga se emplearon funciones de transferencia de desempeño de pavimentos generales.

### 3.2.2 Métodos Probabilísticos Híbridos

Rodríguez presenta una evaluación probabilística del método de diseño AASHTO-93 de pavimentos bajo condiciones chilenas (Rodríguez, Thenoux, & Gonzáles, 2016). A partir de ella se obtienen funciones de densidad de probabilidad para estimar probabilísticamente la vida útil del pavimento en términos de ejes equivalentes sencillos. Este trabajo se basa en una metodología empírico-mecanicista y toma en cuenta la variabilidad de los datos de entrada y salida.

Para cumplir con esta evaluación, se desarrolló una herramienta de simulación basada en el método de Montecarlo. Con ella se puede evaluar de manera reiterada la respuesta que tiene el método AASHTO-93, cuando las variables son representadas mediante funciones de distribución de probabilidad. Esto permite evaluar la probabilidad que tienen las carreteras chilenas clasificadas mediante un diseño factorial según su ubicación geográfica, capacidad estructural y tránsito de alcanzar el tiempo de servicio en términos de ejes equivalentes.

Las variables aleatorias de entrada que utiliza este método, son el número estructural (SN) y el Módulo Resiliente de la capa de subrasante. Las funciones de densidad que representan a cada variable, se obtuvieron de encontrar una función de distribución de probabilidad que mejor se ajuste a los elementos de cada variable mediante el uso de un software estadístico.

El modelo se ejecutó un cierto número de iteraciones, calculadas a partir de una prueba T de Student para un 95% de confiabilidad. Se ajustaron funciones de densidad de probabilidad a los datos de salida, lo que establece el pronóstico de ejes equivalentes sencillos de 8.2 toneladas que representan el tiempo de vida útil del pavimento.

## 4 Desarrollo del Análisis Estocástico Basado en la Metodología Empírico-Mecanicista

Es importante mencionar que las metodologías de diseño de pavimentos empleadas actualmente son completamente empíricas y limitadas, especialmente al momento de considerar el tránsito. Estas limitaciones en los métodos de diseño, permiten entender la necesidad de implementar un cambio en ellos que admitan una caracterización adecuada de las condiciones *in-situ*. En cambio, las metodologías empírico-mecanicistas presentan cambios importantes en el diseño de los pavimentos, principalmente en la forma en que se modelan las cargas del tránsito, las propiedades de los materiales y las condiciones climáticas.

Sin embargo, se requiere incorporar a las metodologías empírico-mecanicistas métodos probabilísticos. Esto permitirá identificar el comportamiento y analizar la variabilidad de las condiciones *in-situ*. Además, este tipo de metodologías no emplean técnicas probabilísticas que permitan realizar un pretratamiento estadístico para ordenar la información y eliminar los datos atípicos presentes en las variables de entrada. Por una parte, todos los métodos de diseño actuales introducen incertidumbre o sesgo debido a que se basan en el criterio del diseñador o proyectista. Por otra parte, se requiere de la implementación de factores de seguridad al considerar condiciones *in-situ*.

Por lo tanto, con el desarrollo de esta metodología de diseño mejoraremos significativamente el desempeño de dichos pavimentos mediante la aplicación de un análisis probabilista. Esto permite analizar la variabilidad de las condiciones *in-situ* que se presentan en la zona de estudio. El trabajo desarrollado en esta investigación se compone de cuatro fases importantes (Ver **Figura 10**), las cuales se describen detalladamente a continuación.

### 4.1 Metodología

El trabajo desarrollado en esta investigación consta de cuatro fases importantes, las cuales son descritas en las siguientes líneas y representadas en la **Figura 10**.

1. **Caracterización y Pre-procesamiento de las Condiciones *in-situ*.** El trabajo de investigación está basado en un análisis probabilístico, el cual depende de sus condiciones *in-situ* como son las propiedades de los materiales, el tránsito vehicular y el clima. Por lo que, a partir de ensayos de mecánica de suelos en campo, se obtienen las características mecánicas de los materiales de banco que constituyen la estructura de un pavimento. Por una parte, con base en estas propiedades mecánicas de los materiales se determina el grado de saturación correspondiente al material. De una base de datos climáticos se obtienen los valores correspondientes para la temperatura. Además, de la recolección de datos de tránsito se determinan los espectros de carga de los diferentes tipos de ejes y el

Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA). Una vez recabada la información correspondiente a las variables de entrada, se realiza un pre-procesamiento estadístico de la información basado en técnicas probabilísticas. Estas técnicas son tomadas como un instrumento basado en un conjunto de métodos que nos permiten evidenciar la distribución de los elementos de la muestra. Esto permite poder observar valores atípicos dentro de los elementos de dicha muestra que son observaciones aparentemente muy diferentes a otras mediciones en el conjunto de datos. Los valores atípicos pueden ser el resultado de fluctuaciones aleatorias en los datos o errores que no son de muestreo (e.g. errores de registro de datos). La identificación de un valor atípico implica el juicio de ingeniería en combinación con un criterio objetivo (Wholson, Wholson, & Pande, 2016). Este criterio objetivo se refiere a elaborar “límites” contra los cuales se comparan todos los valores de datos. Cualquier valor por debajo del “límite inferior” o por encima del “límite superior” se considerará valor atípico y será eliminado. Existen dos maneras de determinar los límites, mediante el empleo de la media y la desviación estándar o mediante el uso de percentiles (Wholson, Wholson, & Pande, 2016). En este trabajo se emplea el uso de percentiles por encima del enfoque de la media y desviación estándar debido al hecho de que la media y la desviación estándar no son resistentes a los valores atípicos que estamos tratando de identificar.

## 2. Aplicación de Modelos Climáticos.

A partir de los datos las propiedades de los materiales y el clima ya procesados, se utilizan ciertos modelos climáticos que ayudan a determinar los efectos que el medio ambiente produce sobre las propiedades de los materiales utilizados. Y con ello poder estimar la variación durante el año de dichas propiedades.

## 3. Aplicación de Métodos de Simulación.

Para evaluar de manera reiterada la respuesta que tiene el diseño de la estructura del pavimento, tomando en cuenta sus condiciones *in situ* (cuando estas se representan como funciones de densidad de probabilidad), se procede a desarrollar un modelo de diseño basado en el método de simulación Montecarlo. Este método permite analizar la variabilidad de los datos de las condiciones *in situ*, obtenidos del modelo climático y la información referente a los espectros de carga.

## 4. Determinación de la Durabilidad de la Estructura del Pavimento.

Para predecir el número de ciclos hasta la falla por fatiga de la carpeta asfáltica y por deformación permanente de las capas inferiores para cada nivel de esfuerzo. De acuerdo a la metodología empírico-mecanicista, se utiliza una solución alterna y sencilla de la teoría multicapa elástica, aplicando el método de Odemark. Este método nos permite calcular de manera simplificada la respuesta que tiene un sistema multicapa a esfuerzos de tensión y deformación al transformar el sistema en un semi-espacio homogéneo e isótropo, mediante un modelo elástico único. Lo anterior debido a que los pavimentos flexibles están diseñados y construidos en base a un sistema de capas con distintas propiedades mecánicas. Dónde, las capas

superiores son las de mejor calidad y esta va disminuyendo de acuerdo a la profundidad hasta llegar al terreno natural. Con base en lo anterior, se usa la solución de Boussinesq, ya que dicho sistema cuenta con un área circular uniformemente cargada, de radio  $a$  que representa la llanta de un vehículo. Lo cual permite determinar la respuesta del pavimento, es decir, los esfuerzos y deformaciones presentes en las capas de la estructura del mismo, ante la aplicación de las condiciones *in-situ*. A partir de la determinación de los esfuerzos y deformaciones, se aplican las funciones de transferencia de desempeño del pavimento deducidas del método de la UNAM, IMT y métodos generales. Esto con la finalidad de poder generar distribuciones para el desempeño de la estructura de pavimento analizada. Además, se emplea la ley de Miner como modelo típico para acumulación de daños. Determinando de esta manera el daño ( $D_i$ ) en cada ciclo ( $i$ ) y para el modelo de simulación Monte Carlo. El daño total se determina al obtener el cociente de la suma del daño  $D_i$  de todos los ciclos y para cada espectro de carga empleado, sobre el número total de ciclos. El número total de repeticiones para llegar a la falla ( $n$ ) para la estructura de pavimento analizada y los espectros de carga empleados se obtiene escalando el daño a un valor crítico de 1.0.

Si el diseño cumple con los requisitos de diseño para su vida útil proyectada, se toma como diseño final. En caso contrario, es decir, que no satisfaga los requisitos de diseño, se procede a cambiar los tipos y propiedades de materiales a utilizar de acuerdo con el diagrama de la **Figura 10**.



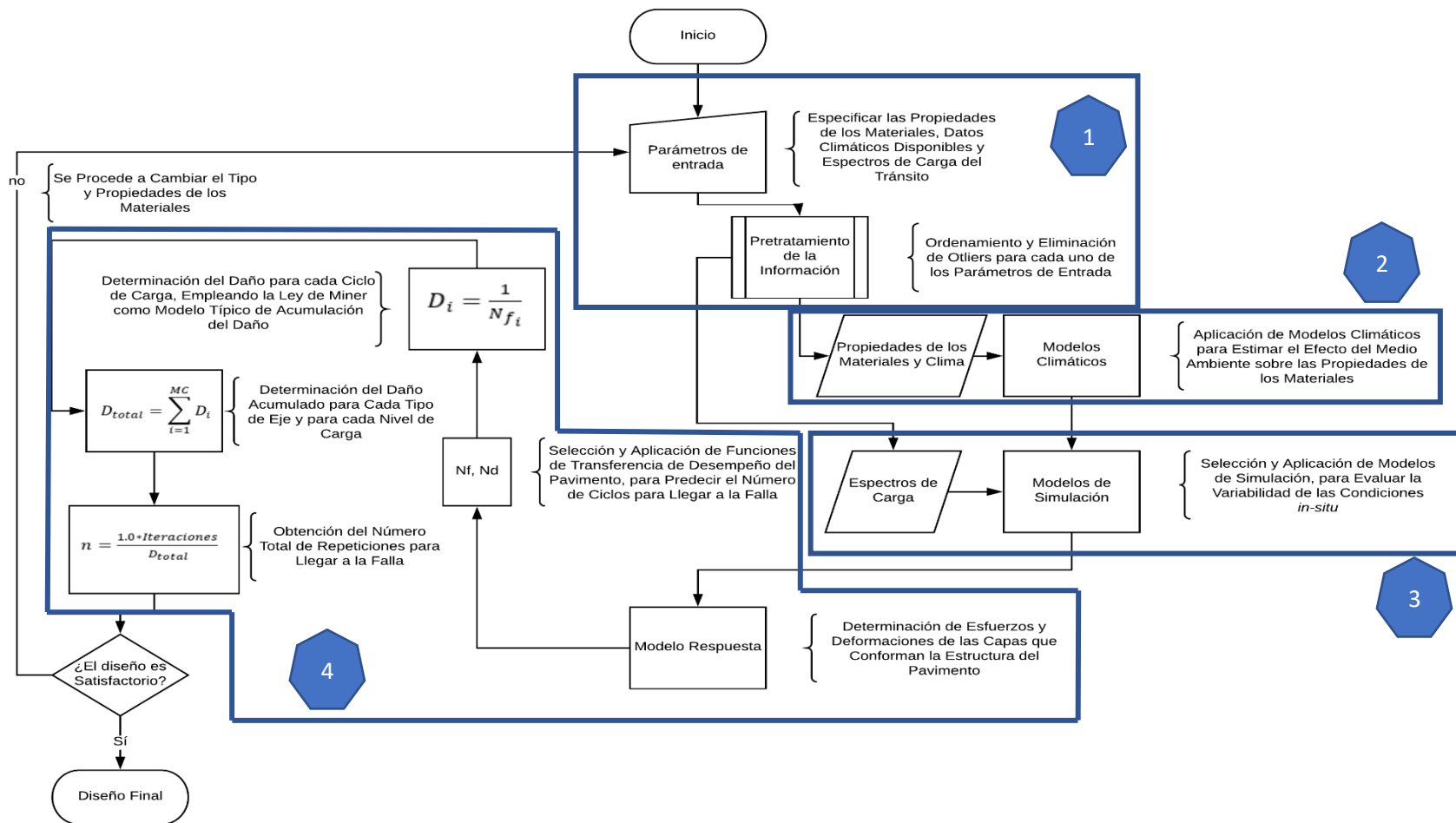


Figura 10. Diagrama de Flujo para el Análisis Estocástico Basado en la Metodología Empírico-Mecanicista

## 4.2 Caracterización y Pre-procesamiento de las Condiciones *In-Situ*

A partir de ensayos de mecánica de suelos en campo, se obtienen las características mecánicas de los materiales de banco que constituyen la estructura de un pavimento. La manera más adecuada de caracterizar los materiales es en términos de módulo de elasticidad dinámico ( $M_D$ ) para el caso de carpetas asfálticas y módulo resiliente ( $M_R$ ) para capas granulares no tratadas. Se puede decir que esta propiedad fundamental de los materiales que forman parte de la sección estructural de un pavimento, se puede determinar de ensayos de laboratorio de carga repetida, (T-342-11, 2015) para el módulo elástico y (ASTM T307-99) para el módulo resiliente. La selección de las muestras se debe realizar empleando una tabla de número aleatorios compuesta, de acuerdo con lo especificado de la Norma (M-CAL-1-02/, 2001) Criterios Estadísticos de Muestreo.

Por una parte, con base en estas propiedades mecánicas de los materiales se determina el grado de saturación correspondiente al material empleando modelos de equilibrio de humedad. El agua debida a la precipitación debe desalojarse rápidamente a través de la capa de drenaje hacia la cuneta o al dren longitudinal. De esta manera, el contenido de agua en la subrasante será debido al nivel freático. Debido a la relación que existe entre la succión y el contenido de agua, una manera simple para determinar la succión es a través del contenido de agua. (Huang, 2004).

Para analizar la variabilidad del grado de saturación se tomarán en cuenta tres casos generales. Cuando el nivel de aguas freáticas (NAF) se encuentre muy cercano a la superficie, otro caso será, debido a infiltraciones producidas por la precipitación en zonas donde se tenga una precipitación mayor a 250mm por año. Por último, cuando la presencia del nivel de aguas freáticas no se encuentre lo suficientemente cerca como para producir cambios en el grado de saturación y su precipitación sea menor a 250mm por año (Transport Research Laboratory, 1993).

A partir del nivel de aguas freáticas que se tenga en la zona de estudio, se analizará la variabilidad del grado de saturación por ascensión capilar. Lo anterior debido a que afectaría directamente en el comportamiento de las capas estabilizadas mecánicamente. Debido a que como se conoce, la presencia de NAF en una masa de suelo cambia la resistencia del suelo.

Por otra parte, de una base de datos climáticos se obtienen los valores correspondientes para la temperatura. Para la temperatura máxima, se revisarán las temperaturas máximas que se presentan durante los 7 días consecutivos más calurosos del año. Para la temperatura mínima, de igual manera se propone tomar los datos de los 7 días con la temperatura más baja. Para fines prácticos, se tomarán las lecturas de los últimos diez años, de esta manera se tendrá una muestra representativa.

A partir de la recolección de datos de tránsito se determinan los espectros de carga de los diferentes tipos de ejes y el Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA). Para obtener un espectro de carga se necesita conocer los datos de peso por eje en un sitio específico, este tipo de estudio se conoce por sus siglas en inglés como WIM (Weight in Motion). Con las tecnologías más recientes, esas estaciones son muy fáciles de operar y registran en tiempo real la configuración y pesos de cada eje de los vehículos de carga circulando a velocidades de operación.

De acuerdo con Garnica (2009), los espectros de carga se calculan usualmente para cada tipo de eje: sencillo dual, tándem y tridem. Pueden ser desarrollados basándose en los tipos de datos (WIM) en el que se representan a manera de distribuciones de frecuencia, otra visión del comportamiento del tránsito vehicular. Los espectros de carga son una herramienta de análisis para utilizar un esquema agregado de la clasificación vehicular, los cuales identifican cuantos ejes (sencillos, duales, tridem) se presentan para cada tipo de vehículo, y sus cargas normalizadas se divide en intervalos de frecuencia. Este análisis puede ser para cada tipo de vehículo en particular o bien para un mismo eje que incluya a todos los vehículos del análisis.

Por lo general, al analizar la información de ciertos eventos, esta se encuentra en forma de series a través del tiempo. Dicho formato no es de gran utilidad cuando se requiere obtener un comportamiento basado en variabilidad con cierto comportamiento probabilístico (Reza & García, 1996). Por lo que, para determinar este comportamiento en cada variable, es necesario presentar la información como tablas de frecuencia, con la finalidad de determinar su función de distribución de probabilidad con una ecuación empírica idéntica.

Una vez recabada la información correspondiente a las variables de entrada, se realiza un pre-procesamiento estadístico de la información basado en técnicas probabilísticas. Estas técnicas son tomadas como un instrumento basado en un conjunto de métodos que nos permiten evidenciar la distribución de los elementos de la muestra. Esto permite poder observar valores atípicos dentro de los elementos de dicha muestra y así poder eliminarlos. Los valores atípicos quedan definidos como observaciones aparentemente muy diferentes de otras estimaciones en el conjunto de datos y estos pueden deberse a fluctuaciones aleatorias en los datos o errores de registro (Pande & Wholshon, 2016). Para analizar la información recolectada es necesario determinar los límites superiores e inferiores contra los cuales vamos a comparar nuestra base de datos. Existen dos maneras de determinar los límites, por una parte, se puede determinar a partir de la media y la desviación estándar. Por otra parte, una manera más eficaz de identificarlos y la cual empleamos en este trabajo de investigación, es mediante el uso de percentiles ya que la media y la desviación estándar no son parámetros resistentes a los valores atípicos que estamos tratando de identificar.

### 4.3 Aplicación de Modelos Climáticos

A partir de los datos las propiedades de los materiales y el clima ya procesados, se utilizan ciertos modelos climáticos que ayudan a determinar los efectos que el medio ambiente produce sobre las propiedades de los materiales utilizados. Y con ello poder estimar la variación durante el año de dichas propiedades. Los modelos climáticos son sistemas de ecuaciones que intentan reproducir el comportamiento del mundo real. Estos permiten predecir la evolución del sistema que se estudia, en este caso, los efectos de la temperatura y del contenido de humedad sobre las propiedades de los materiales.

#### 4.3.1 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. Para

finés de diseño, se considera la mezcla asfáltica como un sistema trifásico compuesto por una fase sólida, una fase líquida (cemento asfáltico) y una fase gaseosa compuesta por aire como se aprecia en la Figura 11.

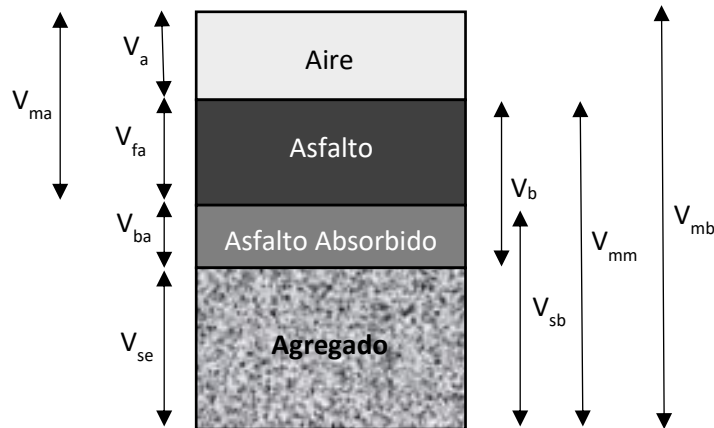


Figura 11.- Diagrama de Fases de una Mezcla Asfáltica (AMAAC, 2013).

Dónde;

$V_{ma}$  = Volumen de Vacíos en el Agregado Mineral.

$V_{mb}$  = Volumen Total de la Mezcla Asfáltica.

$V_{mm}$  = Volumen de la Mezcla Asfáltica sin Vacíos.

$V_{fa}$  = Volumen de Vacíos Llenos de Asfalto.

$V_a$  = Volumen de Vacíos de Aire.

$V_b$  = Volumen de Asfalto Total.

$V_{ba}$  = Volumen de Asfalto Absorbido.

$V_{sb}$  = Volumen Total de Agregado Mineral.

$V_{se}$  = Volumen Efectivo de Agregado Mineral

El desempeño del módulo dinámico está en función de la temperatura, aplicación de carga, envejecimiento, características de la mezcla como viscosidad y contenido de asfalto, 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  $M_D$  cómo se describe en (Elizondo, Badilla, & Ulloa, 2007).

La ecuación de Witczak para el cálculo del  $M_D$  (Elizondo, Badilla, & Ulloa, 2007), permite la posibilidad de predecir el valor del módulo dinámico de la mezcla asfáltica y se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \log E = & 3.750063 + 0.029932P_{200} - 0.001767P_{200}^2 \\ & - 0.002841P_4 - 0.058097V_a - 0.802208 \left( \frac{V_{bff}}{V_{bff} + V_a} \right) \\ & + \frac{3.871977 - 0.0021P_4 + 0.003958P_{38} - 0.000017P_{38}^2 + 0.005470P_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.31335 \log(f) - 0.393532 \log(\eta))}} \end{aligned} \quad (5)$$

en dónde;

$E$  = Módulo Dinámico de la Mezcla Asfáltica.

$\eta$  = 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 3/4.

$P_{38}$  = Porcentaje Retenido en la Malla 3/8.

$P_4$  = Porcentaje Retenido en la Malla N.4.

$P_{200}$  = Porcentaje Retenido en la Malla N. 200.

#### 4.3.2 Modelo Climático para Grado de Saturación

Para el caso de las capas granulares, el parámetro que mide la resistencia de estas es el módulo de resiliencia. El módulo de resiliencia depende del tipo de suelo, densidad y contenido de agua. Por lo tanto, para estimarlo es necesario conocer ciertas características climatológicas y geotécnicas, estructuración y diseño geométrico de la carretera.

Las condiciones de contenido último de agua en subrasantes de carreteras con pavimentos impermeables, se analizarán considerando tres condiciones climatológicas y geotécnicas representativas del laboratorio de transporte de Inglaterra (Au & JL, 1993):

**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.

Los criterios de diseño para pavimentos flexibles pueden ser muy generales y pueden adaptarse a diferentes indicadores de resistencia, entre ellos pueden estar las diferentes pruebas triaxiales o la prueba de placa, en condiciones estáticas o dinámicas. Este método de diseño tomará como indicador de resistencia el módulo de resiliencia ( $M_R$ ) para las capas de suelos.

El módulo de resiliencia se puede determinar directamente en laboratorio mediante la prueba AASHTO T-307 o puede ser obtenido a través del uso de correlaciones con otras propiedades de resistencia de materiales como es el CBR tal y como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3.- Modelos que Relacionan las Propiedades Índice y de Resistencia con el  $M_R$  (AASHTO, 2004).**

Propiedad Índice/Resistencia	Modelo	Comentarios	Prueba Estándar
CBR	$M_R = 2555(CBR)^{0.64}$	CBR = California Bearing Ratio, porcentajes	AASHTO T193, "The California Bearing Ratio"
Valor R	$M_R = 1155 + 555R(20)$	R = Valor R	AASHTO T190 "Resistance R-Value and Expansion Pressure of Compacted Soils"
Coefficiente de Capa AASHTO	$M_R = 30000 \left( \frac{a_i}{0.14} \right) (20)$	$a_i$ = Coeficiente de Capa AASHTO	AASHTO Guide for the Design of Pavement Structures
IP y Granulometría*	$CBR = \frac{75}{1 + 0.728(wIP)}$	IPw = P200*IP IP = Índice Plástico	AASHTO T27 "Sieve Analysis of Coarse and Fine Aggregates" AASHTO T90 "Determining the Plastic Limit and Plasticity Index of Soil"
DCP*	$CBR = \frac{292}{DCP^{1.12}}$	DCP = índice DCP, mm/blow	ASTMD 6951, "Standard Test Method for the Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications"

\*El CBR se utiliza para estimar el  $M_R$ .

El contenido de agua dentro de la estructura del pavimento se puede emplear para revisar la variabilidad en el módulo resiliente. A partir de esto se pueden determinar los efectos de este parámetro climático produce en el comportamiento de la estructura del pavimento.

#### 4.3.2.1 Modelo Climático para la Categoría 1 del AASHTO 2004

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 (AASHTO, 2004):

$$\log \frac{M_R}{M_{Ropt}} = a + \frac{b - a}{1 + EXP \left( \ln \frac{-b}{a} + k_m (Sr - Sr_{opt}) \right)} \quad (6)$$

Donde:

$M_R/M_{Ropt}$  = Relación del módulo resiliente;

Donde:

$M_R$  = Módulo resiliente en cierto tiempo.

$M_{Ropt}$  = Módulo resiliente en una condición de referencia.

$a$  = Valor mínimo de  $\log \frac{M_R}{M_{Ropt}}$ .

$b$  = Valor máximo de  $\log \frac{M_R}{M_{Ropt}}$ .

$k_m$  = Parámetro de regresión.

$(Sr - Sr_{opt})$  = Variación en el grado de saturación expresado en decimal.

De acuerdo con los datos de literatura y tomando una relación de módulos de 2.5 para materiales de grano fino y 2 para materiales de grano grueso, los valores de  $a$ ,  $b$  y  $k_m$  para ambos tipos de materiales se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4.- Valores de  $a$ ,  $b$  y  $k_m$  para Materiales de Grano Fino y Grano Grueso (AASHTO, 2004).

Parámetro	Materiales de Grano Grueso	Materiales de Grano Fino	Comentarios
$a$	-0.3123	-0.5934	Parámetro de regresión.
$b$	0.3	0.4	Asumiendo de manera conservadora que corresponde a relaciones de módulo de 2.5 y 2, respectivamente.
$K_m$	6.8157	6.1324	Parámetro de regresión.

En la Figura 12 se muestra un diagrama de flujo del proceso para la corrección del módulo resiliente  $M_R$ . 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 ( $\gamma_{d\ max}$ ) 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, 2004). 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 (6), mediante la cual se determinará el valor real del  $M_R$  a utilizar en el análisis estocástico.

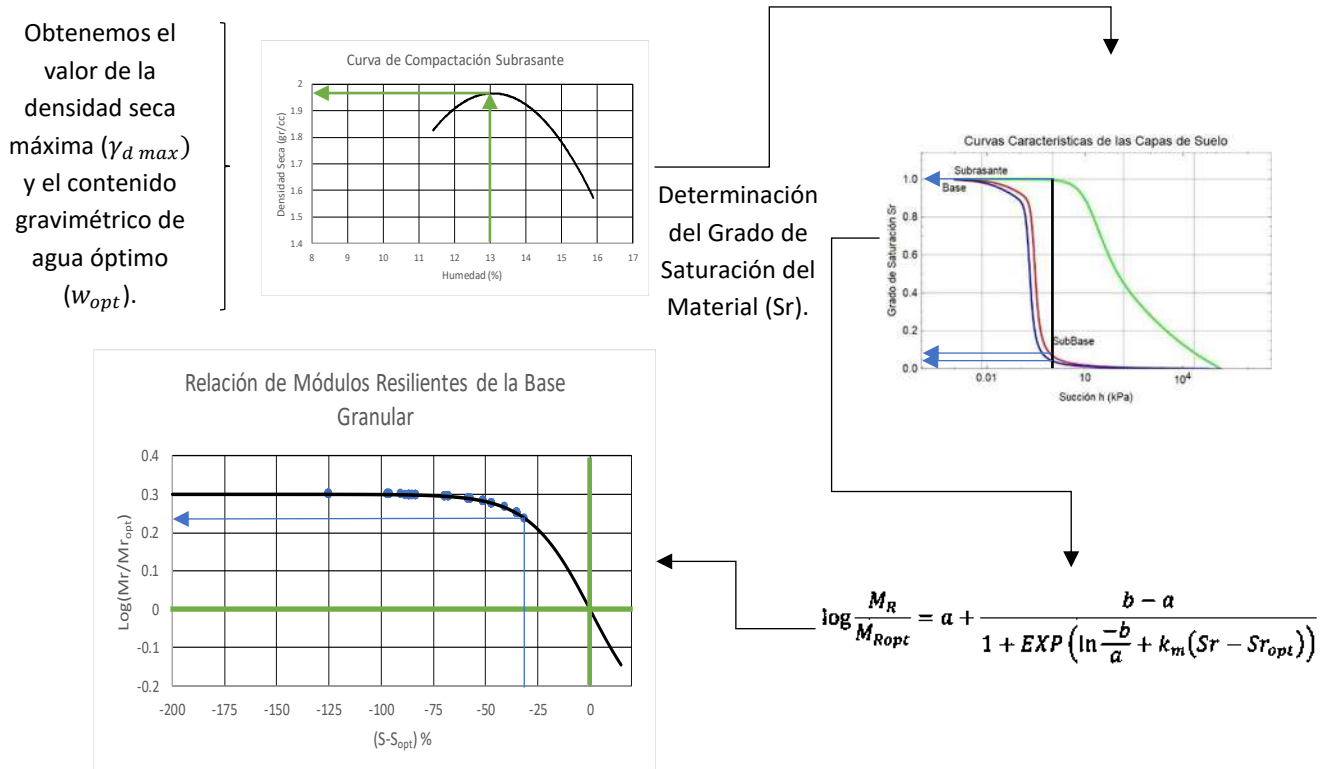


Figura 12.- Proceso para Determinar el Valor del Módulo Resiliente.

4.3.2.2 Elección de Condiciones Óptimas como Referencia y Condiciones Iniciales para  $M_R$   
Aquí se presenta la justificación por la cual se elige el óptimo como condición de referencia para la evaluación de  $M_R$  y como condición inicial para capas compactadas para los datos de entrada del software de la Guía AASHTO de Diseño.

A partir de la literatura se encontró que la mayoría de las pruebas de módulo de resiliencia se han realizado en muestras con condiciones óptimas ( $\gamma_d = \gamma_{d\ máx}$ ,  $w = w_{opt}$  y  $S_r = S_{r_{opt}}$ ) que tomando otras condiciones. Por lo tanto, si el óptimo se convierte en la condición de referencia, la base de datos para el valor de  $M_{Ropt}$  crecerá rápidamente y la capacidad de hacer estimaciones más razonables de  $M_{Ropt}$  sin necesidad de realizar pruebas crecerá también.



En la práctica es común pedir a los constructores que compacten las bases a no menos del 95% del  $\gamma_d^{máx}$  de acuerdo con la norma de compactación AASTHO con energía modificada y para las otras capas a 95% de  $\gamma_d^{máx}$  de acuerdo con la norma de compactación AASTHO con energía estándar. Debido a que los constructores generalmente compactan un poco por encima del valor mínimo requerido, la compactación de campo de  $\gamma_d = \gamma_d^{máx}$  es una aproximación razonable usada como condición de referencia en la Guía AASTHO de Diseño.

Elegir el óptimo como condición de referencia y condición inicial es razonable y a su vez práctico. Tanto la densidad como el contenido de agua de compactación pueden ser medidos en varios puntos específicos de la estructura del pavimento, pero no antes de su construcción. Sin embargo, el diseño se realiza mucho antes de la construcción. Además, incluso si se conocieran los valores precisos de  $\gamma_d$  y  $w$  durante la etapa del diseño, la probabilidad de tener una base de datos de valores de  $M_R$  en esta condición no es alta.

Si se considera la compactación con  $Sr_{opt}$ , que  $Sr$  cambia (incrementa o decrece) a un valor de equilibrio  $Sr_{equil}$  con el tiempo como se muestra en la Figura 13 y Figura 14. En cualquier caso,  $Sr_{equil}$  es determinado por el modelo desarrollado en este trabajo de investigación utilizando el nivel de aguas freáticas  $NAF$  y la curva característica. Por lo tanto, el valor de  $Sr_{equil}$  no depende del  $Sr$  inicial. Si el grado de saturación inicial  $Sr_0$  es ligeramente superior al  $Sr_{opt}$  como se muestra en la Figura 13 o ligeramente inferior como se aprecia en la Figura 14, la trayectoria de la línea discontinua tiende a  $Sr_{equil}$ . Dado que el óptimo ha sido elegido como la condición de referencia, el cambio de  $Sr_{opt}$  a  $Sr_{equil}$  es de interés primario. El proceso para realizar una mejor estimación del  $M_R$  en condiciones de equilibrio es el siguiente:

1. Estimar o medir  $M_R$  en condiciones óptimas para obtener  $M_{Ropt}$ .
2. Estimar o medir  $Sr_{opt}$ .
3. Determinar  $S_{equil}$ , tal y como se describe más adelante en este mismo apartado.
4. Usar  $(Sr_{opt} - Sr_{equil})$  para evaluar el cambio en  $M_R$  desde de la condición de referencia ( $M_{Ropt}$ ) hasta la condición de equilibrio ( $M_{Requil}$ ).

Cuando utilizamos el proceso anteriormente descrito, no se presenta algún error significativo en  $M_{Requil}$  al utilizar  $Sr_{opt}$  en lugar de  $Sr_0$  real. El único error que se produce es que se utiliza la curva continua en lugar de la curva discontinua para calcular los valores intermedios de  $M_R$  antes de que el tiempo de equilibrio  $t_{equil}$ , es alcanzado. El procedimiento más preciso sería seguir usando  $Sr_{opt}$  como referencia, pero para saltar inicialmente a  $Sr_0$  y luego seguir la curva discontinua a  $Sr_{equil}$ . Sin embargo, este procedimiento se considera injustificado por varias razones:

- En primer lugar, implica las dificultades de una estimación a priori de  $Sr_0$ , como ya se mencionó anteriormente.
- En segundo lugar, cuando se considera relativamente corta la duración de  $t_{equil}$ , es evidente que las diferencias entre la curva discontinua y la sólida de la Figura 13 o la Figura 14, no produce algún error significativo en la estimación del daño acumulativo para la

estructura del pavimento. Esto es particularmente cierto si la estructura del pavimento no se carga con tránsito vehicular hasta después de alcanzar las condiciones de equilibrio.

Los resultados de análisis anteriores indican que  $t_{equil}$  es del orden de horas o días para la mayoría de materiales de grano grueso y semanas a varios meses para la gran mayoría de materiales de grano fino. Esta duración es obviamente muy corta en comparación con una vida de diseño de 20 o 25 años. Por lo tanto, lo más importante es obtener la mejor estimación posible de  $M_{Requit}$ , que es eficaz el 98% o 99% de la vida de diseño en zonas no congeladas, mientras que un error menor en  $M_R$  antes de alcanzar el  $t_{equil}$  no tiene ninguna consecuencia.

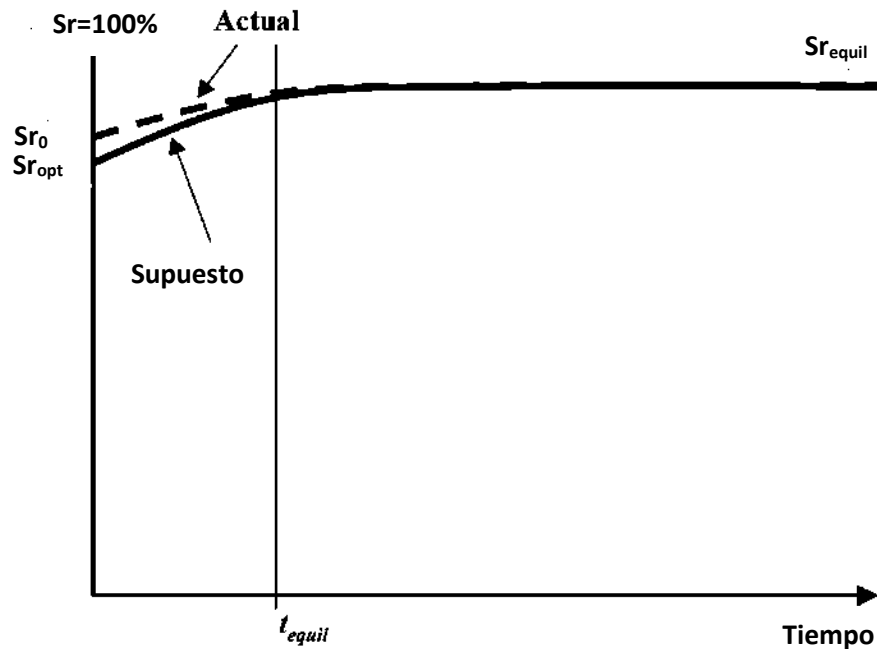


Figura 13.- Variación del Grado de Saturación con el Tiempo (AASHTO, 2004).

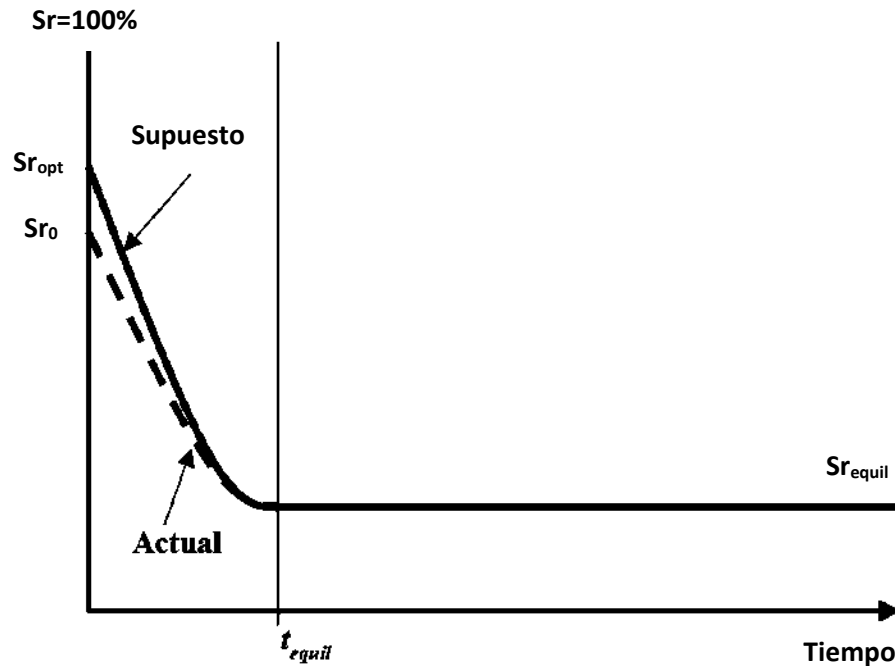


Figura 14.- Variación del Grado de Saturación con el Tiempo (AASHTO, 2004).

#### 4.3.2.3 Determinación de la Densidad Seca Máxima y del Contenido de Agua Gravimétrico Óptimo

Los parámetros que nos interesa conocer para poder aplicar el modelo climático son la densidad seca máxima ( $\gamma_{d\ max}$ ), gravedad específica ( $G_s$ ) y el contenido gravimétrico de agua óptimo ( $w_{opt}$ ) de la capa de material compactado que se está analizando. Por lo cual el análisis parte de las curvas de compactación de los materiales utilizados en las capas de suelos correspondientes a la estructura del pavimento que se muestran en la Figura 15. A partir de estos tres datos de entrada, los demás parámetros de *masa – volumen* pueden ser determinados, incluyendo el grado de saturación inicial, ( $S_{r_{opt}}$ ), contenido volumétrico de agua óptimo, ( $\theta_{opt}$ ), y el contenido de agua saturado ( $\theta_{sat}$ ) (AASHTO, 2004). Estos cálculos son realizados internamente por modelo climático empleado en este trabajo de investigación y que se muestra en la ecuación (6).

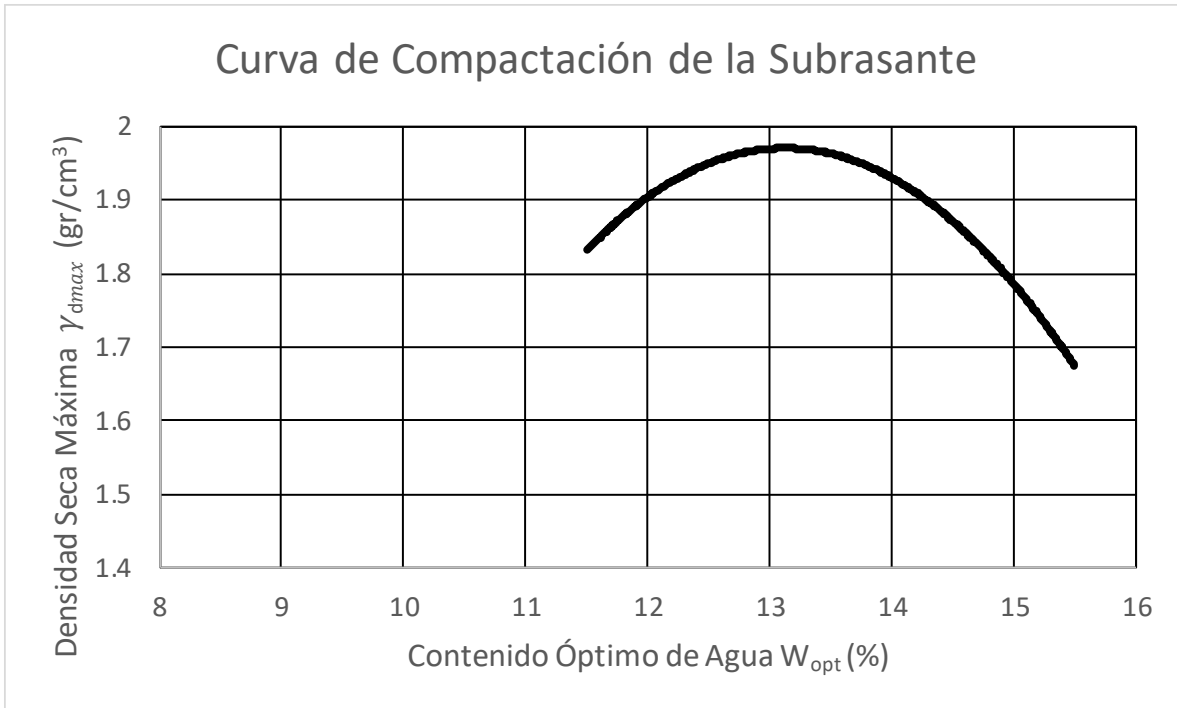


Figura 15.- Curva de Compactación para el Material Utilizado en la Capa de Subrasante.

Estos parámetros los calcula internamente el modelo a partir de  $\gamma_{d max}$ ,  $w_{opt}$  (determinados por la curva de compactación) y  $G_s$  utilizando las ecuaciones que se muestran a continuación:

$$\theta_{opt} = \frac{(w_{opt})(\gamma_{d max})}{\gamma_w} \quad (7)$$

$$Sr_{opt} = \frac{\theta_{opt}}{1 - \frac{\gamma_{d max}}{(\gamma_w)(G_s)}} \quad (8)$$

$$\theta_{sat} = \frac{\theta_{opt}}{Sr_{opt}} \quad (9)$$

en dónde;

$\gamma_w$  = Es el peso específico del agua.

#### 4.3.2.4 Modelo de Equilibrio de Humedad

De acuerdo con lo anterior, se implementará el modelo descrito por Huang (2004). Con base en este modelo, se tomarán las siguientes consideraciones:

- Cuando no hay carga o presión por sobrecarga, la succión es igual a una presión de poro negativa.
- Cuando se aplica una carga o sobrecarga a un suelo insaturado con un contenido de agua o succión dada, el contenido de agua o succión permanece igual, pero la presión de poro se hace menos negativa.

La relación entre la presión de poro y la succión puede ser expresada como:

$$u = h + \alpha p \quad (10)$$

Dónde;

$u$  = Es la presión de poro cuando el suelo está cargado.

$h$  = La succión del suelo, la cual es una presión negativa.

$p$  = Es la presión aplicada o sobrecarga, la cual siempre es positiva.

$\alpha$  = Es el factor de compresibilidad, el cual varía desde 0 para suelos insaturados y sin cohesión a 1 para suelos saturados. Para suelos insaturados y cohesivos,  $\alpha$  está relacionada al índice de plasticidad por:

$$\alpha = 0.03 \times IP \quad (11)$$

La presión de poro en un suelo depende únicamente de la distancia al nivel de aguas freáticas:

$$u = -z\gamma_w \quad (12)$$

En dónde;

$z$  = Es la distancia al nivel de aguas freáticas.

$\gamma_w$  = Es el peso específico del agua.

Este simple hecho puede ser explicado considerando los suelos como grupo de tubos capilares de diferentes tamaños. El agua subirá por cada uno de estos tubos capilares a una elevación que depende del tamaño del tubo. A una distancia  $z$  sobre el nivel freático, se formará un gran número de meniscos en las interfaces aire-agua, provocando una tensión en cada altura de elevación capilar.

En resumen, el procedimiento para determinar el contenido de agua de equilibrio en cualquier punto en una estructura de pavimento se puede resumir como a continuación:

1. Determinar la distancia  $z$  desde el punto hasta el nivel de agua freáticas.
2. Determinar la presión de carga o sobre carga  $p$ .
3. Determinar el factor de compresibilidad  $\alpha$  a partir de la ecuación **(11)**.
4. Determinar la succión  $h$  a partir de la ecuación **(10)**.
5. Determinar el contenido de agua a partir de la curva característica.

#### 4.3.2.5 Curva Característica de los Materiales de las Capas de Suelo

La curva característica nos define la relación entre el contenido de agua y la succión para un suelo dado (AASHTO, 2004). A partir de la curva característica, se determinarán sus parámetros que posteriormente permitirán determinar el valor del grado de saturación ( $S_r$ ), proceso que se describe en los siguientes puntos.

1. Medir directamente el contenido de agua óptimo,  $\theta_{opt}$  y peso seco máximo,  $\gamma_{d max}$ .
2. Medir directamente la gravedad específica del suelo,  $G_s$ .
3. Medir directamente los valores de P200 (decimal), D60 (pulgadas) y el IP (porcentaje).
4. Una vez determinados los parámetros anteriores, el modelo realiza los siguientes cálculos de manera interna:
  - a. Calcular  $P200 * IP$ .
  - b. Calcular  $\theta_{opt}$ ,  $\theta_{sat}$  y  $Sr_{opt}$ .
5. Con base en un análisis de regresión no lineal, el modelo climático calculará los parámetros  $a_f$ ,  $b_f$ ,  $c_f$  y  $h_r$  por medio de correlaciones con  $P200 * IP$  y D60 .
  - a. Si  $P200 * IP > 0$ .
  - b.  $a_f = 0.00364(P_{200} * IP)^{3.35} + 4(P_{200} * IP) + 11, kPa$
  - c.  $\frac{b_f}{c_f} = -2.313(P_{200} * IP)^{0.14} + 5$
  - d.  $c_f = 0.0514(P_{200} * IP)^{0.465} + 0.5$
  - e.  $\frac{h_r}{a_f} = 32.44e^{0.0186P_{200}IP}$
  - f. Si  $P200 * IP = 0$
  - g.  $a_f = 0.8627(D_{60})^{-0.751}, kPa$
  - h.  $b_f = 7.5$
  - i.  $c_f = 0.1772 \ln(D_{60}) + 0.7734$
  - j.  $\frac{h_r}{a_f} = \frac{1}{D_{60} + 9.7e^{-4}}$
6. Conocidos los parámetros anteriores se procede a determinar el valor del grado de saturación del suelo  $S_r$  mediante las siguientes ecuaciones:

$$a. C(h) = \left[ 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{h}{h_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{1.45 \times 10^5}{h_r}\right)} \right]$$

$$b. S_r = C(h)x \left[ \frac{\theta_{sat}}{\ln \left[ \exp(1) + \left( \frac{h}{a_f} \right)^{b_f} \right] \right]^{c_f} \right]$$

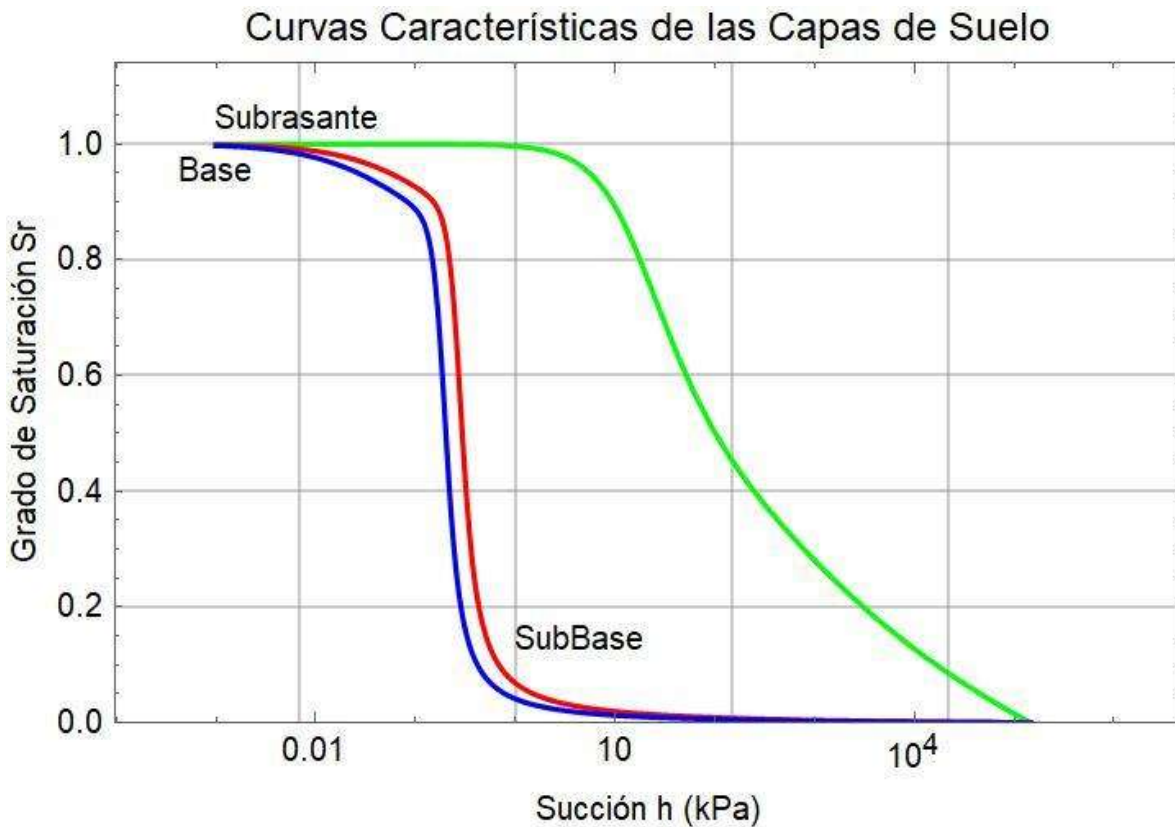


Figura 16.- Curvas Características de las Capas de Suelo.

La naturaleza de la curva característica está directamente ligada a la composición granulométrica y estructura del suelo, por lo que esta relación puede cambiar para diferentes tipos de suelos. En la Figura 16 se muestran las curvas características de las capas de base granular, subbase y subrasante. Nótese que, para el caso de la capa de subrasante, el material se desatura en forma gradual; mientras que, para las otras dos capas, la pérdida del contenido de agua ocurre de manera súbita.

De acuerdo con los datos de literatura y tomando una relación de módulos de 2.5 para materiales de grano fino y 2 para materiales de grano grueso, los valores de  $a$ ,  $b$  y  $k_m$  para ambos tipos de materiales. Las predicciones de este modelo revisado se muestran en la Figura 17 y en la Figura 18. Este modelo está implementado dentro del código vinculado a este análisis estocástico.

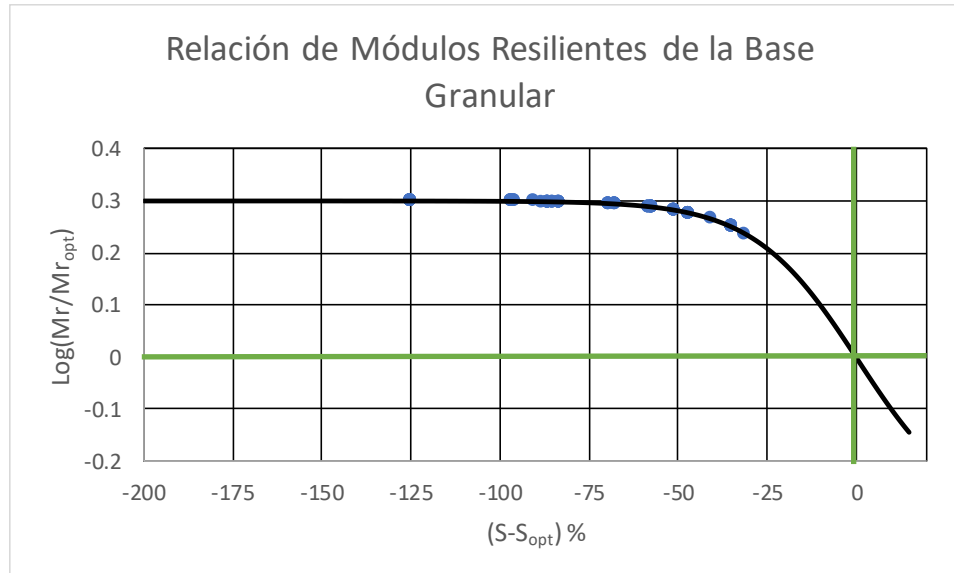


Figura 17.- Relación Módulo Resiliente-Contenido de Agua para Materiales de Grano Grueso.

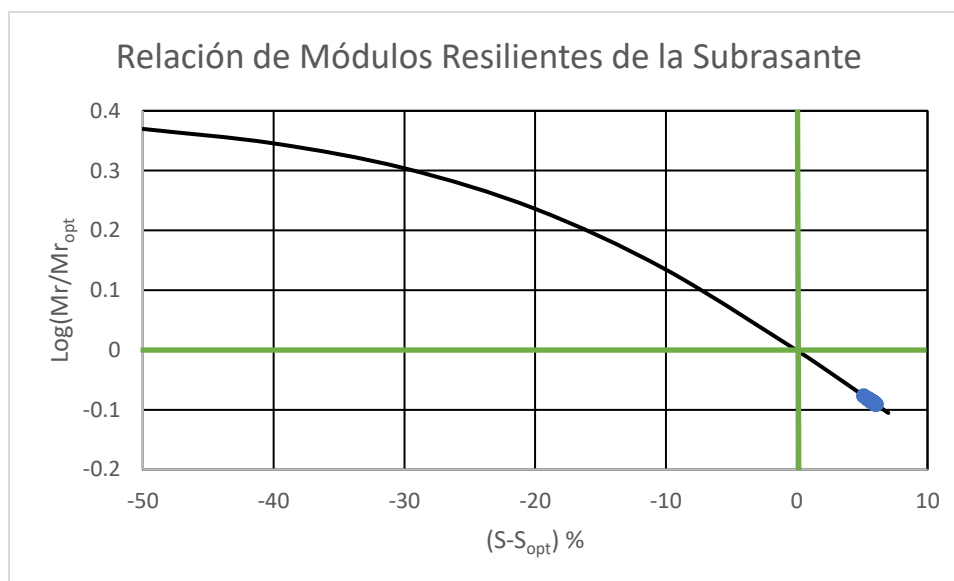


Figura 18.- Relación Módulo Resiliente-Contenido de Agua para Materiales de Grano Fino.

#### 4.4 Aplicación de Métodos de Simulación

Para evaluar de manera reiterada la respuesta que tiene el diseño de la estructura del pavimento, tomando en cuenta sus condiciones *in situ* (cuando estas se representan como funciones de densidad de probabilidad), se procede a desarrollar un programa de diseño basado en el método de simulación Montecarlo

El método de Montecarlo se puede simular en el programa Mathematica, generando números pseudo aleatorios reales de acuerdo con una distribución normal. La distribución de probabilidad se obtuvo a partir de los datos de las condiciones *in situ*. Dicha distribución tiene una media ( $\mu$ ) y una



desviación estándar ( $\sigma$ ), de las funciones de densidad de probabilidad correspondientes a las variables que se analizarán (en este caso las variables corresponden al clima, tránsito y propiedades mecánicas de los materiales).

La función de distribución de probabilidad es generada a partir de la unión de los puntos medios de cada estrato y debe presentar forma semejante a la distribución de los elementos de la muestra por los estratos a ser calculados en condiciones predeterminadas. A continuación, se realiza la verificación de la distribución de los números pseudo aleatorios en relación a la proporción de la distribución inicial estratificada, por la prueba de adherencia Chi cuadrado y por comparación de la máxima verosimilitud de la simulación en relación a la pequeña muestra. Con la condición de la prueba de adherencia aprobada, se valida la simulación y se realiza la construcción de las figuras con los resultados obtenidos (Martins, Ferreira, Pardal, & Morano, 2012).

#### 4.5 Determinación de la Vida Útil de la Estructura del Pavimento

Para predecir el número de ciclos hasta la falla por fatiga de la carpeta asfáltica y por deformación permanente de las capas inferiores para cada nivel de esfuerzo. De acuerdo con la metodología empírico-mecanicista, se utiliza una solución alterna y sencilla de la teoría multicapa elástica, aplicando el método de Odemark (Chávez, Pastor, Alarcon, & Arreygue, 2013). Este método nos permite calcular de manera simplificada la respuesta que tiene un sistema multicapa a esfuerzos de tensión y deformación al transformar el sistema en un semi-espacio homogéneo e isótropo, mediante un modelo elástico único como se muestra en la siguiente figura.

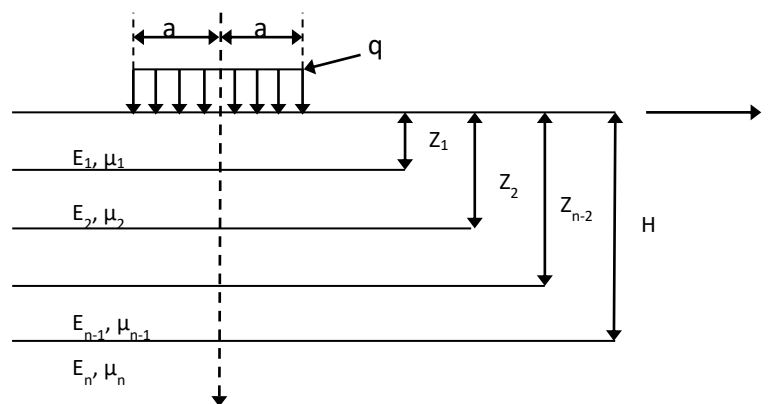


Figura 19.- Sistema de  $n$  Capas en Coordenadas Cilíndricas.

Lo anterior debido a que los pavimentos flexibles están diseñados y construidos en base a un sistema de capas con distintas propiedades mecánicas. Dónde, las capas superiores son las de mejor calidad y esta va disminuyendo de acuerdo con la profundidad hasta llegar al terreno natural como lo marca Huang (2004). Con base en lo anterior, se usa la solución de Boussinesq, ya que dicho sistema cuenta

con un área circular uniformemente cargada, de radio  $a$  que representa la llanta de un vehículo. Lo cual permite determinar la respuesta del pavimento, es decir, los esfuerzos y deformaciones presentes en las capas de la estructura del mismo, ante la aplicación de las condiciones *in-situ* y mediante las ecuaciones (13), (14) y (15).

$$\sigma_z = q \left( 1 - \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{R}{z}\right)^2\right)^{3/2}} \right) \quad (13)$$

$$\varepsilon_r = \frac{(1 + \mu)q}{2E} \left( \frac{-\frac{z}{R}}{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{z}{R}\right)^2}\right)^3} - (1 - 2\mu) \left( \frac{\frac{z}{R}}{\sqrt{1 + \left(\frac{z}{R}\right)^2}} - 1 \right) \right) \quad (14)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\frac{1 - \mu}{2\mu}(\sigma_z - E\varepsilon_r) - \mu\sigma_z}{E_2} \quad (15)$$

#### 4.5.1 Funciones de Transferencia

A partir de la determinación de los esfuerzos y deformaciones, se aplican las funciones de transferencia de desempeño del pavimento deducidas del método de la UNAM; donde la ecuación (16) es para deformación permanente, mientras que la ecuación (18) es para fatiga de la carpeta asfáltica. Las funciones de transferencia del IMT para deformaciones permanentes es la que corresponden a la ecuación (20) mientras que para fatiga de la carpeta asfáltica es la correspondiente a la ecuación (19). Esto con la finalidad de poder generar distribuciones para el desempeño de la estructura de pavimento analizada.

$$\log \Sigma L = \frac{1}{0.1761} (\log \overline{VRS}_z - \log \overline{VRS}_0 - \log F_z) \quad (16)$$

Donde:

$\Sigma L$  = Número de ciclos hasta la falla por deformación permanente.

$\overline{VRS}_z$  = Estimación del valor relativo de soporte crítico esperado en campo, igual a  $\overline{VRS}_z(1 - 0.84V)$ .

$\overline{VRS}_z$  = Valor relativo de soporte medio esperado en el campo.

$V$  = Coeficiente de variación del VRS en el campo.

$VRS_0$  = Constante experimental igual a  $10^B$

$$\text{para bases } B = B1 = 0.8477 + 0.12U$$

$$\text{para sub - bases y terracerías } B = B2 = 0.4547 + 0.1593U$$

$U$  = Es la abscisa de la distribución normal estándar para un nivel de confianza  $Q_U$ .

$F_z$  = Coeficiente de influencia de Boussinesq.

$$F_{z(i)} = 1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{3/2}} \quad (17)$$

$a$  = Área de contacto de la carga.

$z$  = Espesor equivalente, en cm, igual a  $\sum_{i=1}^n aiDi$

$$a_1 = 0 \text{ para carpetas de riegos}$$

$$a_1 \leq 2 \text{ para carpetas de concreto asfáltico}$$

$$a_i = 1 \text{ para materiales estabilizados mecánicamente en bases, subbases y terracerías } (i \geq 2)$$

Función de transferencia de desempeño del pavimento deducida del método de la UNAM, para fatiga de la carpeta asfáltica:

$$\log \varepsilon = 3.78 - 0.088U - 0.21 \log N_f \quad (18)$$

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.

$U$  = Es la abscisa de la distribución normal estándar para un nivel de confianza  $Q_U$ .

Función de transferencia de desempeño del pavimento deducida empleada por el IMT, para fatiga de la carpeta asfáltica:

$$N_f = f_1 \varepsilon_t^{-f_2} \quad (19)$$

Donde:

$N_f$  = Número de Repeticiones para Agrietamiento por Fatiga.

$\varepsilon_t$  = Deformación de Tensión.

$f_1$  y  $f_2$  = Factores de Ajuste.

Función de transferencia de desempeño del pavimento deducida empleada por el IMT, para deformación permanente de las capas de suelo:

$$N_d = f_4 \varepsilon_c^{-f_5} \quad (20)$$

Donde:

$N_d$  = Número de Repeticiones para Deformaciones Permanentes.

$\varepsilon_c$  = Deformación de Compresión.

$f_4$  y  $f_5$  = Factores de Ajuste.

#### 4.5.2 Determinación del Daño

Además, se emplea la ley de Miner como modelo típico para acumulación de daños. Determinando de esta manera el daño ( $D_i$ ) en cada ciclo ( $i$ ) y para el modelo de simulación como se muestra en la siguiente ecuación.

$$D_i = \frac{1}{N_{fi}} \quad (21)$$

Donde:

$N_{fi}$  = Número de Ciclos para Agrietamiento por Fatiga.

$D_i$  = Daño para cada Ciclo.

El daño total se determina al obtener la sumatoria del daño  $D_i$  de todos los ciclos y para cada espectro de carga empleado como se muestra en la siguiente ecuación.

$$D_{total} = \sum_{ij=1}^{MC} D_{ij} \quad (22)$$

Donde:

$MC$  = Iteraciones del método de simulación Montecarlo.

El número total de repeticiones para llegar a la falla ( $n$ ) para la estructura de pavimento analizada y los espectros de carga empleados se obtiene escalando el daño a un valor crítico de 1.0, aplicando a siguiente ecuación.

$$n = \frac{1.0 * Iteraciones}{D_{total}} \quad (23)$$

Donde:

$n$  = Número Total de Repeticiones para Presentar Alguna Falla.

$Iteraciones$  = Número de Veces que se Repite el Método de Montecarlo.

$D_{total}$  = Daño Acumulado.

Si el diseño cumple con los requisitos de diseño para su vida útil proyectada, se toma como diseño final. En caso contrario, es decir, que no satisfaga los requisitos de diseño, se procede a cambiar los tipos y propiedades de materiales a utilizar.

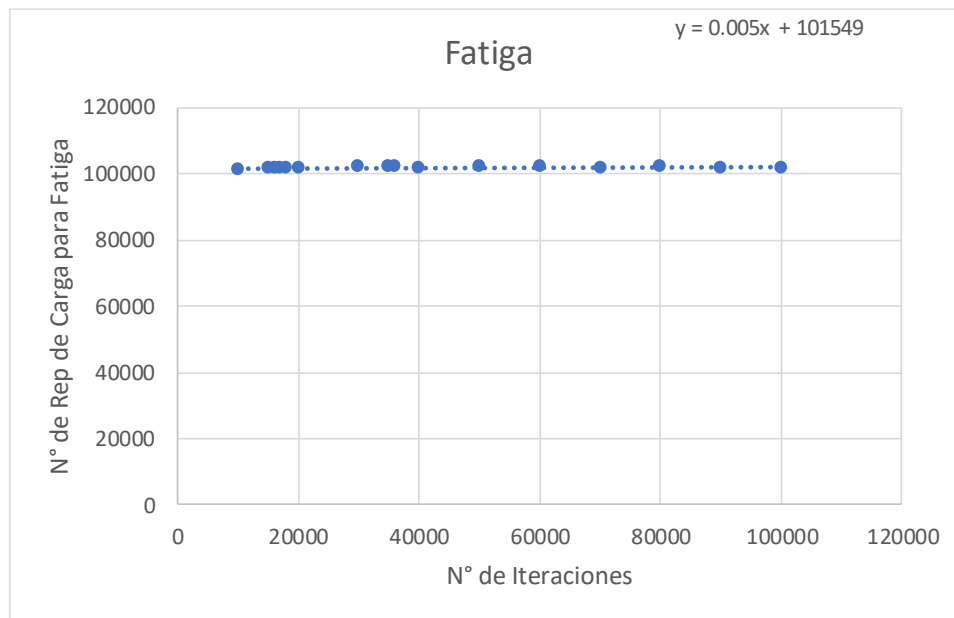


Figura 20.- Análisis de Comportamiento para la Determinación de la Vida Útil por Fatiga.

En la Figura 20 y Figura 21 se presenta un análisis de comportamiento de la vida útil para una estructura de pavimento flexible, mediante la metodología desarrollada en este trabajo de investigación. En él podemos observar que se presenta una ligera variabilidad en los resultados debido al análisis estocástico, en donde podemos observar que el número de repeticiones de carga se ve afectado por las solicitaciones de cargas debidas al paso de  $j$  configuraciones de ejes, al transitar de manera aleatoria sobre el tramo de pavimento considerado y esta aleatoriedad está

ligada con el número de iteraciones empleado para la generación pseudoaleatoria de datos en cada muestra. Lo anterior permite observar que los resultados se comportan de manera variable a través del tiempo.

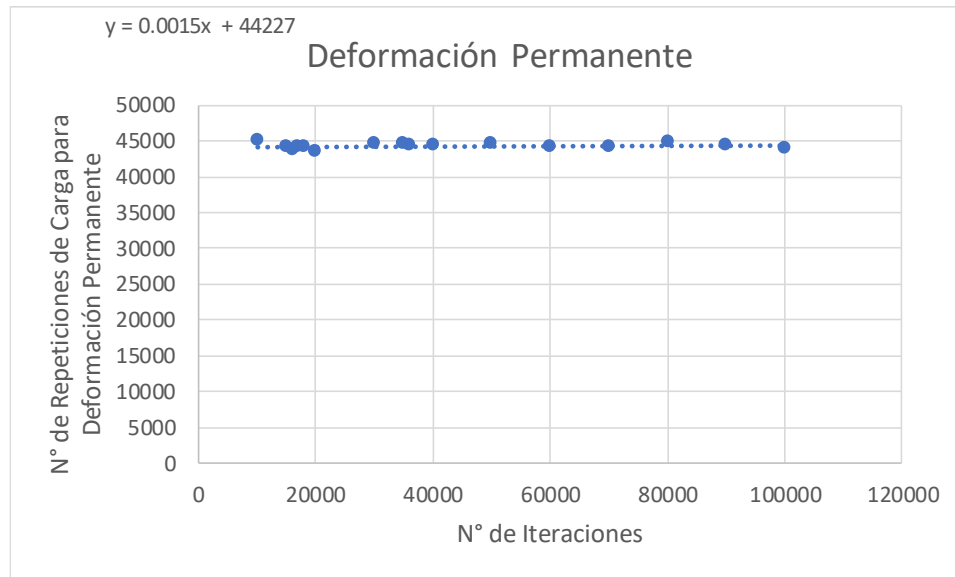


Figura 21.- Análisis de Comportamiento para la Determinación de la Vida Útil por Deformación Permanente.

## 5 Resultados

En este capítulo se presenta un modelo de simulación, basado en la metodología empírico-mecanicista para el diseño de estructuras de pavimento flexible que se describió anteriormente. El cual es una representación simplificada del sistema y que fue elaborado para comprender, controlar y predecir el comportamiento de dicho sistema (ver Figura 22). 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 en el capítulo 4. El modelo de este sistema se compone de tres variables importantes, Tránsito, Propiedades Mecánicas de los Materiales y Clima. En él se modela la interacción que existe entre las cargas propias del flujo aleatorio de vehículos y los efectos del clima sobre las propiedades mecánicas de los materiales, en una sección estructural de pavimento flexible. Por lo tanto, se utiliza un método de simulación que permiten analizar la variabilidad de los parámetros de entrada. Las propiedades de los materiales involucran los espesores de cada capa y su resistencia. Los parámetros medioambientales se consideran en términos de humedad y temperatura. En cuestión del tránsito se requieren los diferentes tipos de ejes, la magnitud de la carga y la cantidad de cada tipo de eje por cada nivel de carga. Mediante la aplicación de modelos climáticos, se determina el efecto que produce el clima (humedad y temperatura) sobre las propiedades de los materiales de la mezcla asfáltica y de las capas granulares con el paso del tiempo. Los factores anteriores derivan, con base en el modelo estructural de Odemark en lo que se conoce como respuesta del pavimento. A partir de lo anterior y con la aplicación de las funciones de transferencia se predice el número de ciclos para llegar a la falla por fatiga de la carpeta asfáltica y por deformación permanente de las capas inferiores y para cada nivel de esfuerzo.

Si el diseño de la estructura del pavimento cumple con los requisitos de diseño para su vida útil proyectada, se toma como diseño final. En el caso que no se satisfagan los requisitos de diseño, se procede a cambiar los tipos y propiedades de materiales a utilizar.

### 5.1 Modelo del sistema

El modelo del sistema, toma en cuenta las condiciones *in-situ* tales como las propiedades de los materiales, el tránsito y el clima; todas ellas caracterizadas de manera adecuada. La vida útil de los pavimentos flexibles, es resultado de la interacción que existe entre las variables mencionadas y este proceso.

En la Figura 22 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 ( $t$ ).
  - 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, para ello 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 humedad, temperatura y propiedades de los materiales que han sido simuladas.
- 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 ( $n = \frac{1.0 * Iteraciones}{D_{total}}$ ). La aplicación del modelo, permite evaluar de manera reiterada la respuesta estructural que tiene el diseño de la estructura del pavimento ante la aplicación de las diferentes condiciones *in-situ*.



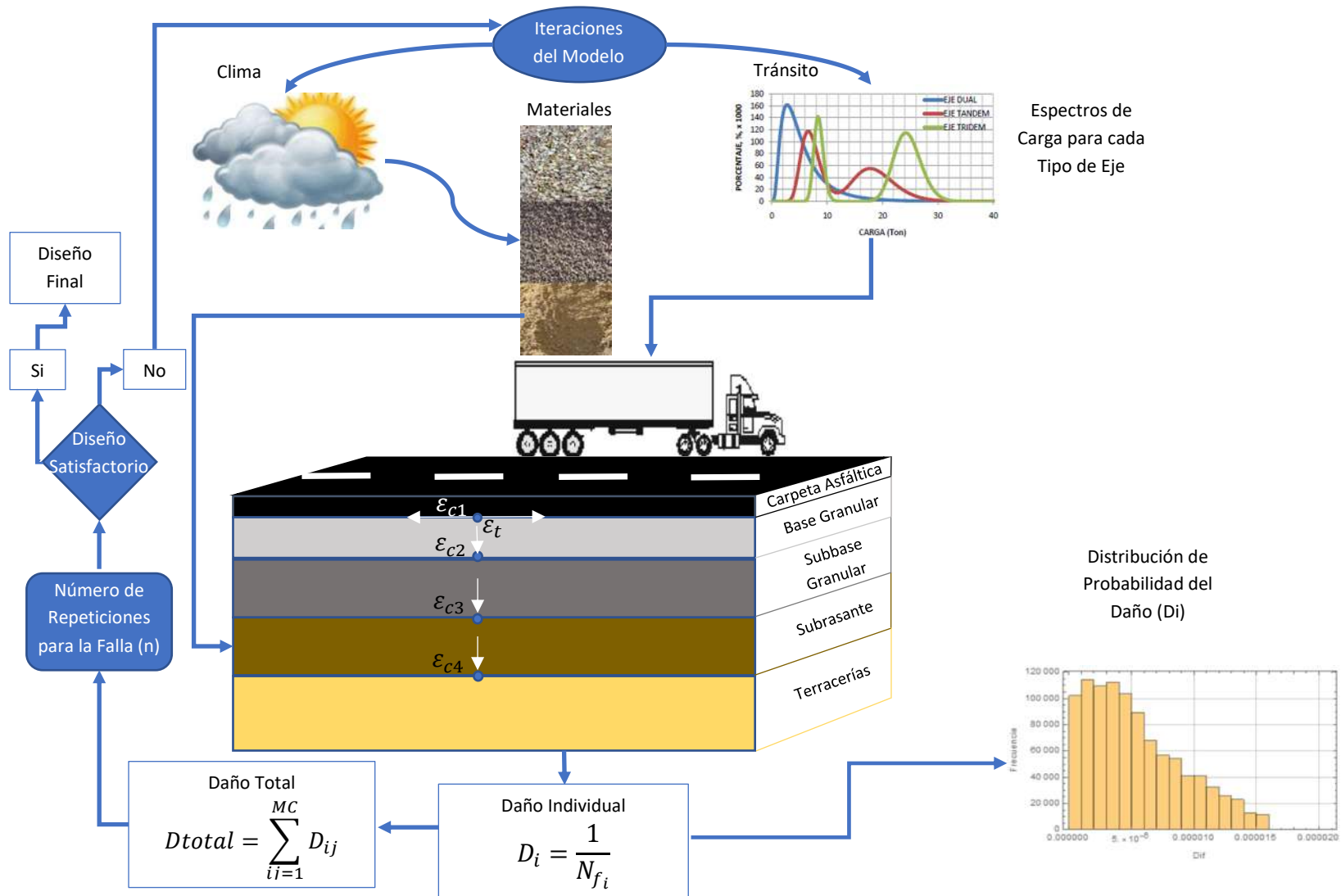


Figura 22.- Modelo del Sistema.

Además, en este capítulo se presenta como herramienta computacional de simulación, una interfaz de usuario para la aplicación del modelo del sistema descrito anteriormente (ver Figura 23). Esta interfaz desarrollada permite analizar y visualizar el comportamiento estructural de las capas que constituyen la estructura del pavimento, ante la aplicación de las condiciones *in-situ* ya mencionadas. La interfaz cuenta con cinco módulos, los cuales se describen a continuación.

The screenshot shows a software interface with a menu bar at the top: "Selección del Modelo", "Datos de Entrada", "Ajuste de Espectros de Carga", "Análisis Probabilístico", and "Histogramas".

**1) Selección del Tipo de Pavimento.** A sidebar on the left has a radio button selected for "Pavimento Flexible".

**2) Selección de funciones.** The main area is titled "Funciones de Transferencia" and contains three options:
 

- UNAM Altas Especificaciones:** Fatiga:  $\text{Log}c=3.78-0.88U-0.21\text{Log}N_f$ ; Deformación Permanente:  $\text{Log}N_d = \frac{1}{0.1761} (\text{Log}CBR - \text{Log}(0.8477+0.12U) - \text{Log}(1 - \frac{x^2}{3}))$
- UNAM Bajas Especificaciones:** Fatiga:  $\text{Log}c=3.843-0.88U-0.21\text{Log}N_f$ ; Deformación Permanente:  $\text{Log}N_d = \frac{1}{0.1761} (\text{Log}CBR - \text{Log}(0.4547+0.1593U) - \text{Log}(1 - \frac{x^2}{3}))$
- General:** Fatiga:  $N_f = 1.56 \times 10^{-10} c^{-4.32}$ ; Deformación Permanente:  $N_d = 6.18 \times 10^{-8} c^{-3.95}$

 A "Configurar" button is at the bottom of this section.

**3) Método de Simulación y Número de Ciclos.** A sidebar on the left has a radio button selected for "Montecarlo". A box next to it shows "Número de Iteraciones" set to "10000".

Figura 23.- Interfaz de Usuario para el Modelo del Sistema.

## 5.2 Selección del Modelo

Este módulo se compone de tres elementos importantes como se muestra en la Figura 23. 1.- Tipo de Pavimento, 2.- Funciones de Transferencia y 3.- Método de Simulación.

En este capítulo se presenta como herramienta computacional de simulación, una interfaz de usuario para la aplicación del modelo del sistema descrito anteriormente. Esta interfaz desarrollada permite analizar y visualizar el comportamiento estructural de las capas que constituyen la estructura del pavimento, ante la aplicación de las condiciones *in-situ* ya mencionadas. La interfaz cuenta con cinco módulos, los cuales se describen a continuación.

- 1. Tipo de Pavimento.** El primer elemento corresponde al tipo de pavimento que se va a analizar. En este caso, sólo se analizan los pavimentos flexibles. Ya que, es la opción más viable debido a que se busca un equilibrio entre los costos de inversión y la vida útil de la estructura del pavimento, Figura 23 (1).
- 2. Funciones de Transferencia.** El segundo elemento permite la selección de las diferentes funciones de transferencia de desempeño del pavimento seleccionadas durante el proceso

metodológico y necesarias para la predicción del número de repeticiones para llegar a la falla, tanto para deformaciones permanentes ( $N_d$ ) como para fatiga de la carpeta asfáltica ( $N_f$ ); correspondientes al método de diseño de la UNAM, tanto para altas como para bajas especificaciones y la función general empleada por el IMT. En este caso, la aplicación nos ayuda a visualizar cada una de estas funciones de transferencia, mostrando los factores que intervienen en cada una de ellas. Estas ecuaciones son las que comúnmente se emplean para el diseño de pavimentos flexibles mexicanos, ver Figura 23(2).

3. **Método de Simulación.** En el tercer elemento, se presenta el modelo de simulación aplicado y el número de ciclos empleados en la simulación, el cual puede ser modificado por el usuario, ver Figura 23(3). Esto permite evaluar de manera reiterada la respuesta que tiene la estructura del pavimento ante las condiciones *in-situ*.

### 5.3 Datos de Entrada

Este módulo corresponde a los datos de entrada, en el cual se introduce la información requerida de las condiciones *in-situ* y cuenta con cuatro submódulos. 1.-Geometría, 2.-Propiedades de los Materiales, 3.- Datos del Tránsito y 4.- Clasificación Vehicular. Este apartado permite captar los datos de la caracterización y pre-procesamiento de acuerdo con lo que se describe en el subcapítulo 4.2. y se aprecia en la Figura 24.

1. **Geometría.** El primer submódulo hace referencia a la geometría del pavimento, es decir, en él se introducen los valores correspondientes de los espesores de cada una de las capas que componen la estructura del pavimento y así mismo visualizar de manera dinámica la estructura de dicho pavimento, ver Figura 24.

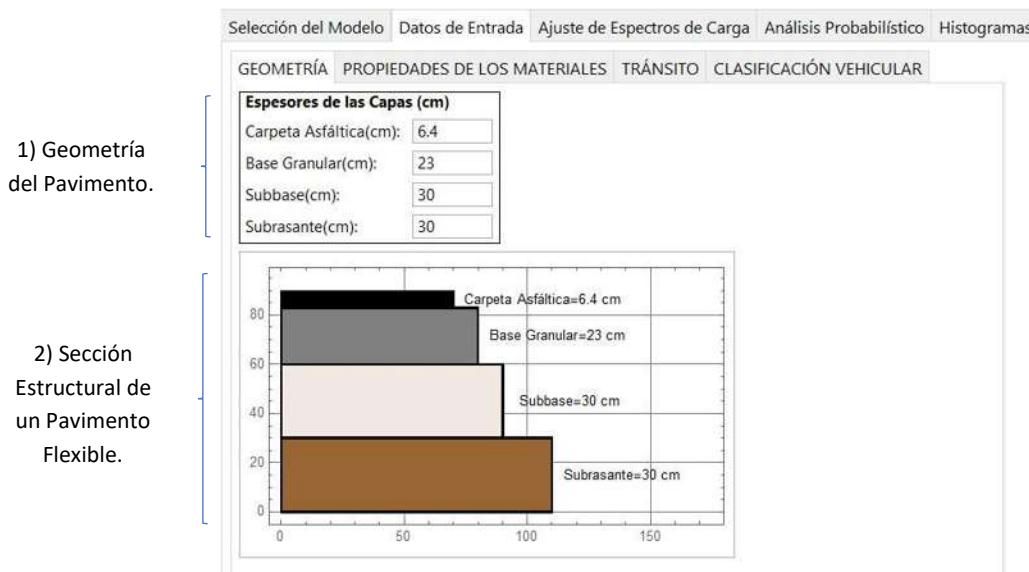


Figura 24.- Módulo "Datos de Entrada".

2. **Propiedades de los Materiales.** El segundo submódulo corresponde a las propiedades de los materiales que, como se menciona en el subcapítulo 4.2, se obtienen a partir de ensayos de mecánica de suelos. Este submódulo se subdivide en cinco elementos. El primer elemento permite determinar el módulo dinámico de la mezcla asfáltica, ya que, es la manera más adecuada de representar la rigidez de la carpeta asfáltica. Para lo cual, se introducen datos como son las coordenadas geográficas de la zona en estudio e información de la mezcla asfáltica como se aprecia en la Figura 25. A partir de la información introducida, se procede a determinar la magnitud del módulo dinámico y su correspondiente corrección por temperatura oprimiendo el botón “Corrección por temperatura”.

Selección del Modelo Datos de Entrada Ajuste de Espectros de Carga Análisis Probabilístico Histogramas

GEOMETRÍA PROPIEDADES DE LOS MATERIALES TRÁNSITO

Módulo Dinámico de la Carpeta Asfáltica Módulo Resiliente de la Base Módulo Resiliente de la Subbase Módulo Resiliente de la Subrasante

Módulo Dinámico (kg/cm <sup>2</sup> )	
Longitud:	<input type="text" value="-101.345"/>
Latitud:	<input type="text" value="19.499"/>
Porcentaje Retenido en la Malla 3/4:	<input type="text" value="0.8"/>
Porcentaje Retenido en la Malla 3/8:	<input type="text" value="0.53"/>
Porcentaje Retenido en la Malla N°4:	<input type="text" value="0.39"/>
Porcentaje Retenido en la Malla N°200:	<input type="text" value="0.07"/>
Frecuencia de Aplicación de la Carga (Hertz):	<input type="text" value="5"/>
Volumen de Aire (%):	<input type="text" value="0.046"/>
Volumen Efectivo de Asfalto (%):	<input type="text" value="0.157"/>
<input type="button" value="Corrección por Temperatura"/>	

1) Coordenadas Geográficas.

2) Datos de la Mezcla Asfáltica.

Figura 25.- Estimación del Módulo Dinámico en el Submódulo "Propiedades de los Materiales".

Los módulos de elasticidad de las capas granulares se debe caracterizar en términos de módulo resiliente, por lo tanto, los siguientes cuatro elementos permiten corregir el valor del dato que representa la rigidez de dichas capas y que componen la estructura del pavimento. Para ello, es necesario introducir información referente a los materiales de cada capa como son el peso específico de los materiales, índice plástico, contenido óptimo de agua, entre otros. Esto conlleva a realizar la corrección del módulo resiliente para funciones de transferencia generales y CBRs para las funciones de transferencia de la UNAM oprimiendo el botón “Corrección por Contenido de Agua” que se muestra en la Figura 26.

Módulo Dinámico de la Carpeta Asáltica   Módulo Resiliente de la Base   Módulo Resiliente de la Subbase   Módulo Resiliente de la Subrasante

Módulo Resiliente (kg/cm <sup>2</sup> )	
Base Granular:	2793.228
Desviación Estándar ( $\sigma$ ):	0.2
Peso Específico de la Base ( $\gamma_m$ ):	1865.93
Índice Plástico de la Base(IP):	0
Contenido de Humedad Óptimo de la Base (Wopt):	0.1
Contenido de Humedad de la Base (w):	0.1088
Peso Específico Seco Máximo ( $\gamma_{dmax}$ ):	1682.83
Gravedad Específica:	2.3
D60:	5
Porcentaje Retenido en la Malla N°200:	0.02
Distancia del Nivel de Aguas Freáticas (NAF):	0
Corregir Módulo Resiliente de la Base	

Figura 26.- Estimación del Módulo Resiliente en el Submódulo "Propiedades de los Materiales".

Selección del Modelo   Datos de Entrada   Ajuste de Espectros de Carga   Análisis Probabilístico   Histogramas

GEOMETRÍA   PROPIEDADES DE LOS MATERIALES   TRÁNSITO

Eje Sencillo ▾

Cantidad de Ejes Sencillos:	<input type="text" value="0.1389"/>
Carga del Ejes Sencillo (Ton):	<input type="text" value="{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12}"/>
Ejes Sencillos por Carga:	<input type="text" value="{0.04, 0.13, 0.27, 0.27, 0.16, 0.05, 0.03, 0.01, 0.02, 0.01, 0.006, 0.004}"/>

Figura 27.- Sub-Módulo "Tránsito".

- Tránsito.** El tercer submódulo hace referencia a los espectros de carga para los diferentes tipos de ejes (sencillo, tándem y tridem), los cuales son determinados a partir de la recolección de datos de tránsito, mediante el empleo de estaciones móviles de pesaje como se menciona en el subcapítulo 4.2. En este submódulo se solicita la información de cada tipo de eje como es el porcentaje en decimales correspondiente a la cantidad de ejes sencillos

aforados, las cargas en toneladas para cada tipo de eje y el porcentaje en decimales de ejes sencillo por cada carga (ver Figura 27).

4. **Clasificación Vehicular.** En el cuarto submódulo se presenta una pestaña en la cual se pide introducir información referente al tránsito como es la clasificación vehicular, TDPA, factores de distribución por carril y sentido, periodo de análisis y la tasa de crecimiento (ver Figura 28). Esta información la requiere el modelo del sistema para determinar los porcentajes y número de repeticiones por tipo de eje y por año de análisis, que posteriormente servirá para determinar la vida útil en años.

Selección del Modelo Datos de Entrada Ajuste de Espectros de Carga Análisis Probabilístico Histogramas

GEOMETRÍA PROPIEDADES DE LOS MATERIALES TRÁNSITO CLASIFICACIÓN VEHICULAR

Composición Vehicular	
C2:	0.052
C3:	0.0406
T3-S2:	0.0303
T3-S3:	0.0157
1-1-2-R4:	0.0001
T3-S2-R4:	0.0155
T01A1:	0.1542

Factor de Distribución por:	
Sentido:	0.5
Carril:	0.5

Periodo de Análisis:	
Vida (años):	1
Tasa de Crecimiento:	0.03

TDPA:	10449
-------	-------

Figura 28.- Sub-Modulo "Clasificación Vehicular".

## 5.4 Ajuste de Espectros de Carga

Este módulo hace referencia a los espectros de carga, que son una herramienta de análisis para utilizar un esquema agregado de la clasificación vehicular, los cuales identifican cuantos ejes (sencillos, duales, tridem) se presentan para cada tipo de vehículo, y sus cargas normalizadas se divide en intervalos de frecuencia. El módulo se subdivide en tres submódulos, Eje Sencillo, Eje Tándem y Eje Tridem (ver Figura 29 (1)). Dentro de cada submódulo se realiza 1.- Ajuste para el espectro analizado y 2.- Determinación de la función de distribución de probabilidad.

1. **Ajuste del Espectro de Carga.** Se presentan las tres funciones de densidad de probabilidad que mejor se ajustan a los elementos de la muestra del tránsito para cada tipo de eje, de las cuales sólo se puede elegir una y será a criterio del diseñador (ver Figura 29 (2)). Las técnicas aplicadas son tomadas como un instrumento basado en un conjunto de métodos que nos permiten evidenciar la distribución de los elementos de la muestra de tránsito.

4. **Función de Distribución de Probabilidad.** En este caso, la aplicación permite visualizar las funciones de distribución de probabilidad determinadas para cada uno de los ajustes construidos, mostrando los factores que se involucran en cada una de ellas (ver Figura 29 (3))

1) Ajuste para cada Tipo de Eje.

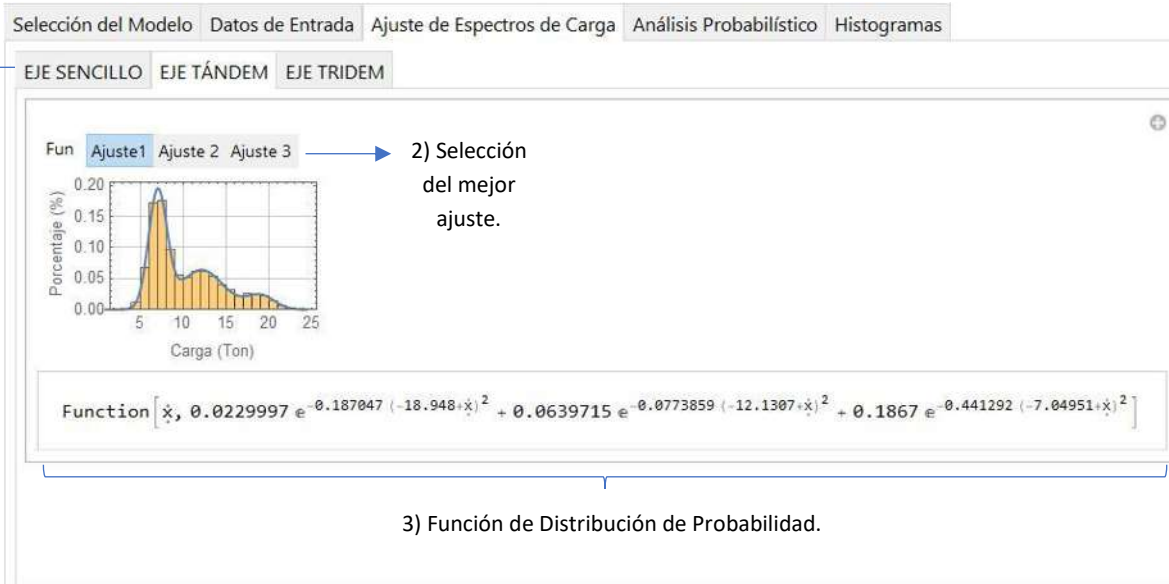


Figura 29.- Módulo "Ajuste de Espectros de Carga".

## 5.5 Análisis Probabilístico

Este módulo se lleva a cabo el análisis probabilístico del modelo, el módulo se divide en tres submódulos. 1.- Nivel de Confianza, 2.- Ejecutar Cálculos, 3.- Resultados.

1. **Nivel de Confianza.** Para llegar a cierto grado de certeza en el diseño de la estructura del pavimento flexible, se emplea el parámetro de confiabilidad. Lo anterior con la finalidad de asegurar que la alternativa de sección estructural del pavimento dure como mínimo el periodo para el cual fue diseñado. En este primer submódulo, el diseñador debe tomar en consideración el tipo e importancia de la carretera, procedimientos y control de construcción y el tipo de conservación previsto para la selección del valor de la confiabilidad que va desde 50% hasta 99%, ver Figura 30 (1). Para esta aplicación desarrollada, se puede variar el valor de confiabilidad únicamente para las funciones de transferencia de la UNAM. Mientras que las funciones de transferencia generales usadas tanto para fatiga como para deformación permanente, ya están calibradas para un valor de 85%.
2. **Ejecutar Cálculos.** En el segundo submódulo se presenta el botón "calcular" que permite ejecutar los cálculos necesarios para determinar el análisis estocástico empleando la metodología empírico-mecanicista. Esto permite determinar el número total de repeticiones de carga para llega a la falla (n) para la estructura del pavimento flexible analizada y los espectros de carga empleados, ver Figura 30 (2).

3. **Resultados.** En el tercer submódulo, se visualizan los resultados del análisis probabilístico. Si el diseño cumple con los requisitos de diseño para su vida útil proyectada, se toma como diseño final. En caso contrario, es decir, que no satisfaga los requisitos de diseño, se procede a cambiar los tipos y propiedades de materiales a utilizar, ver Figura 30 (3).

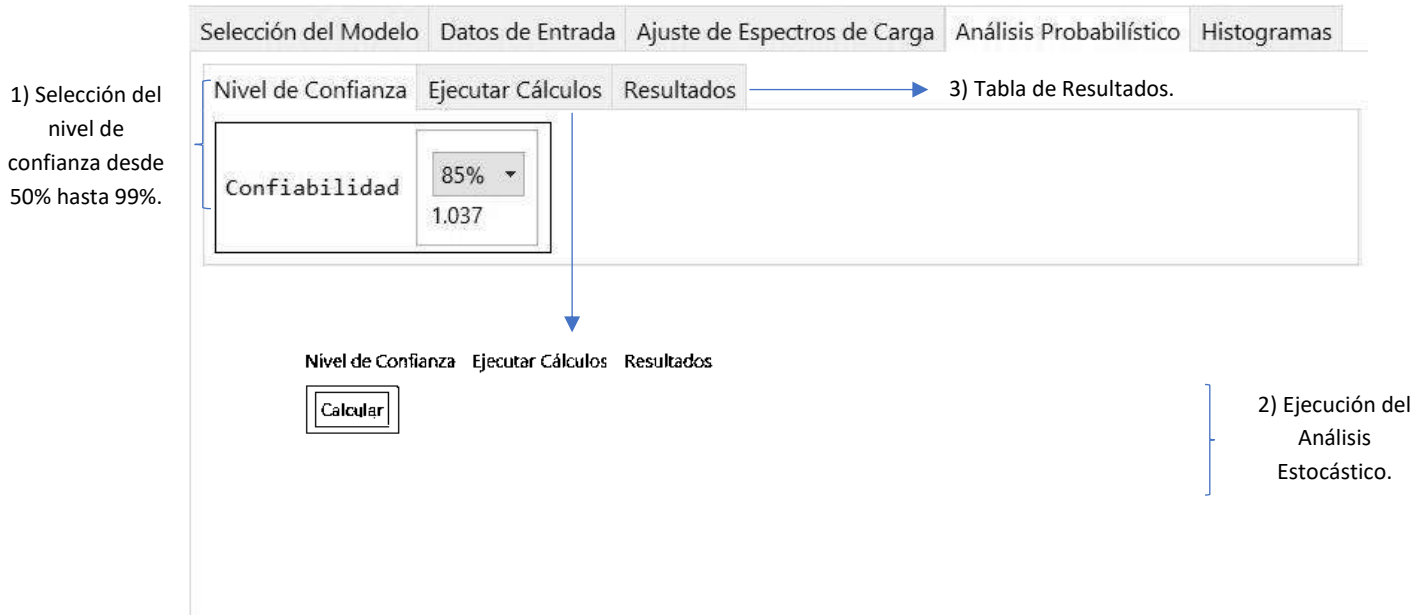


Figura 30.- Módulo "Análisis Probabilístico".

## 5.6 Histogramas

En el quinto módulo se presentan los histogramas de los resultados obtenidos, desglosados en tres submódulos; uno para cada tipo de eje (ver Figura 31). Dentro de cada submódulo se puede observar el histograma para cada resultado obtenido.

1. **Histogramas.** Estos histogramas nos muestran la distribución del conjunto de datos de cada resultado obtenido y, a partir de ello, poder observar la acumulación y variabilidad de los datos derivados del análisis probabilístico (ver Figura 31 (1)).
2. **Menú Desplegable.** Dentro de cada submódulo, se tiene un menú desplegable en el cual se puede elegir cada uno de los diferentes histogramas acorde a los resultados obtenidos (ver Figura 31 (2)).





Figura 31.- Módulo "Histogramas".

## 5.7 Caso de Estudio

Para llevar a cabo el estudio correspondiente a este trabajo de investigación, se efectuará la revisión de una estructura de pavimento flexible mediante el uso de las funciones de transferencia de desempeño del pavimento del IMT y las deducidas por el método de la UNAM para Altas Especificaciones, que se muestran en el segundo elemento de la Figura 23. Para lo cual, se solicitaron datos reales del control de calidad de la construcción de un pavimento flexible a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes del estado de Michoacán, ubicada en la ciudad de Morelia. La información recabada, corresponde a un tramo de pavimento flexible de 4 Km de longitud ubicados entre el municipio de Pátzcuaro y la localidad de Opopeo (municipio de Salvador Escalante), ver Figura 32.

Los 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 realizó empleando una tabla de número aleatorios compuesta, de acuerdo con lo especificado en la Norma (M-CAL-1-02/, 2001) Criterios Estadísticos de Muestreo.

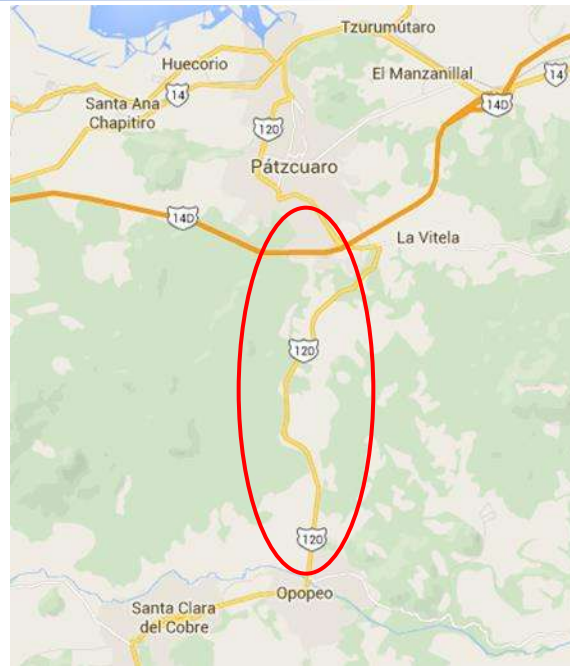


Figura 32.- Ubicación del Tramo en Estudio.

En la Figura 33 se ilustra una estructura de pavimento flexible de cuatro capas compuesta de una mezcla asfáltica en caliente (HMA) sobre una base granular, una capa de subbase y subrasante para su análisis que corresponde a la estructura en campo; la cual fue esquematizada utilizando la interfaz desarrollada en este trabajo de investigación.

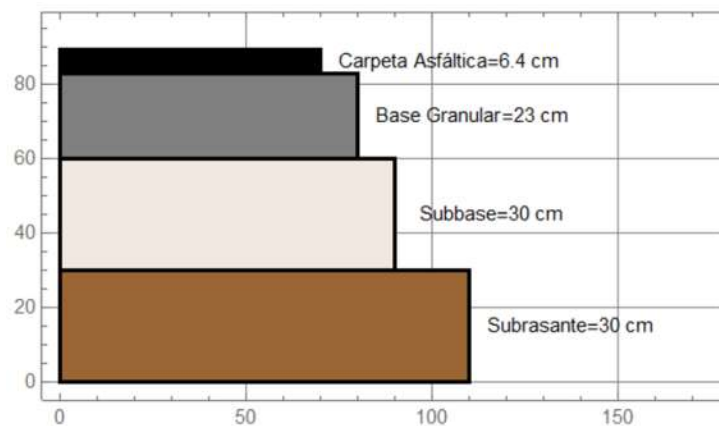


Figura 33.- Estructura de Pavimento Flexible del Tramo Analizado.

La Tabla 5 muestra los datos de las propiedades mecánicas de los materiales de prueba de cada capa correspondientes a la estructura del pavimento antes ilustrada. Las propiedades del material se eligieron para ser representativas y consistentes con un estudio previo de los efectos del espectro de carga en el diseño del pavimento. En la Figura 34 se aprecian los valores de los parámetros

correspondientes a las propiedades de los materiales, tanto de la carpeta asfáltica como de las capas granulares correspondientes a la sección estructural analizada.

**Tabla 5.- Datos de Campo y Laboratorio Correspondientes al Tramo de Pavimento Flexible Analizado.**

DATOS DE CAMPO								
CAPA	ESPESOR (cm)	GRADO DE COMPACTACIÓN (%)	DESVIACIÓN ESTANDAR	CONTENIDO DE AGUA W (%)	CBR (%)	PRUEBA DE REFERENCIA		
TERRAPLÉN	VARIABLE	96	0.2	14.86	5	AASHTO ESTÁNDAR		
SUBRASANTE	30	100	0.2	12.55	20	AASHTO ESTÁNDAR		
SUBBASE	30	100	0.2	12.55	60	AASHTO ESTÁNDAR		
BASE HIDRAULICA	23	100	0.2	10.88	100	AASHTO MODIFICADA		
CAPA ESTABILIZADA CON AGENTE QUÍMICO	ESPESOR (cm)	GRADO DE COMPACTACIÓN (%)	DESVIACIÓN ESTANDAR			PRUEBA DE REFERENCIA		
CARPETA ASFÁLTICA	6.4	93.25	0.2			MARSHALL		
DATOS DE LABORATORIO								
CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA								
M.V.S.S. (kg/m3)	GRANULOMETRÍA	CONTENIDO DE ASFALTO (%)	AFINIDAD	ESTABILIDAD (kg)	FLUJO(mm)	V.V.(%)	V.A.M. (%)	MÓDULO DE RIGIDEZ (kg/cm2)
2203	COMPUESTA	5.83	*****	1199.5	2.74	4.77	17.2	35266

En la cuestión climatológica, los parámetros del clima que se consideran en este trabajo de investigación son el contenido de agua y la temperatura. Para el caso de la temperatura, los registros se encuentran en estaciones climatológicas establecidas en puntos específicos sobre el territorio nacional. El parámetro de la temperatura impacta directamente en el comportamiento de la mezcla asfáltica debido a que, el desempeño del módulo dinámico está en función de la temperatura, aplicación de carga, envejecimiento, características de la mezcla como viscosidad y contenido de asfalto, granulometría y vacíos. Por tal motivo, de una base de datos climáticos se obtienen los valores correspondientes para la temperatura. Para la temperatura máxima, se revisarán las temperaturas máximas que se presentan durante los 7 días consecutivos más calurosos del año. Para la temperatura mínima, de igual manera se propone tomar los datos de los 7 días con la temperatura más baja. Para fines prácticos, se tomarán las lecturas de los últimos diez años, de esta manera se tendrá una muestra representativa.

Para la estimación del tipo de asfalto por grado PG, se aplicó la ecuación (1) con una confiabilidad tanto para alta como para baja temperatura del 98%. Para obtener los parámetros necesarios para la aplicación de dicha ecuación, se trabajó en conjunto con un estudiante de maestría quien desarrolló la quien desarrolló una metodología para la construcción de mapas de temperatura basada en la influencia termo-topográfica y el grado de desempeño aplicada en la selección de cementos asfálticos (Rubio , 2018); a partir de dicho trabajo se generó la información correspondiente para ingresar al modelo climático de temperatura descrito mediante la ecuación (5). A partir de ella se generó la Tabla 28 que se encuentra en el Anexo A, la información presentada

en la tabla mencionada junto con los datos de la mezcla asfáltica se utilizó en nuestro código para corregir el  $M_D$  de la carpeta asfáltica.

Para el caso de las capas granulares, el parámetro que mide la resistencia de estas es el módulo de resiliencia. El módulo de resiliencia depende del tipo de suelo, densidad y contenido de agua. Por lo tanto, para estimarlo es necesario conocer ciertas características climatológicas y geotécnicas, estructuración y diseño geométrico de la carretera. Por cuestiones prácticas y de tiempo, la condición de contenido último de agua en subrasantes de carreteras con pavimentos impermeables, se analizarán considerando únicamente una de las tres condiciones climatológicas y geotécnicas mencionadas en el capítulo 4.

La categoría analizada considera capas de Subrasante 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.

<b>Módulo Dinámico (kg/cm<sup>2</sup>)</b>		<b>Módulo Resiliente (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	
Longitud:	-101.345	Base Granular:	2793.228
Latitud:	19.499	Desviación Estándar ( $\sigma$ ):	0.2
Porcentaje Retenido en la Malla 3/4:	0.8	Peso Específico de la Base ( $\gamma_m$ ):	1865.93
Porcentaje Retenido en la Malla 3/8:	0.53	Índice Plástico de la Base(IP):	0
Porcentaje Retenido en la Malla N°4:	0.39	Contenido de Humedad Óptimo de la Base (Wopt):	0.1
Porcentaje Retenido en la Malla N°200:	0.02	Contenido de Humedad de la Base (w):	0.1088
Frecuencia de Aplicación de la Carga (Hertz):	25	Peso Específico Seco Máximo ( $\gamma_{dmax}$ ):	1682.83
Volumen de Aire (%):	4.6	Gravedad Específica:	2.3
Volumen Efectivo de Asfalto (%):	15.7	D60:	0.8
<b>Corrección por Temperatura</b>		Porcentaje Retenido en la Malla N°200:	0.02
		Distancia del Nivel de Aguas Freáticas (NAF):	0
		<b>Corregir Módulo Resiliente de la Base</b>	
<b>Módulo Resiliente (kg/cm<sup>2</sup>)</b>		<b>Módulo Resiliente (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	
Subbase:	2283.754	Subrasante:	1058.435
Desviación Estándar ( $\sigma$ ):	0.2	Desviación Estándar ( $\sigma$ ):	0.2
Peso Específico de la Subbase ( $\gamma_m$ ):	1810	Peso Específico de la Subrasante ( $\gamma_m$ ):	1793.83
Índice Plástico de la Subbase(IP):	0	Índice Plástico de la Subrasante(IP):	18
Contenido de Humedad Óptimo de la Subbase (Wopt):	0.16	Contenido de Humedad Óptimo de la Subrasante (Wopt):	0.26
Contenido de Humedad de la Subbase (w):	0.11	Contenido de Humedad de la Subrasante (w):	0.1255
Peso Específico Seco Máximo de la Subbase( $\gamma_{dmax}$ ):	1630.63	Peso Específico Seco Máximo de la Subrasante ( $\gamma_{dmax}$ ):	1593.8
Gravedad Específica de la Subbase:	2.3	Gravedad Específica de la Subrasante :	2.3
D60:	0.5	D60:	0.5
Porcentaje Retenido en la Malla N°200:	0.02	Porcentaje Retenido en la Malla N°200:	0.02
Distancia del Nivel de Aguas Freáticas (NAF):	0	Distancia del Nivel de Aguas Freáticas (NAF):	0
<b>Corregir Módulo Resiliente de la Subbase</b>		<b>Corregir Módulo Resiliente de la subrasante</b>	

Figura 34.- Propiedades de los Materiales de la Mezcla Asfáltica y de las Capas Granulares.

Una vez introducidos los datos referentes a cada una de las capas de la estructura del pavimento, se procedió a realizar sus respectivas correcciones. En la siguiente tabla se muestran los valores corregidos empleados para el análisis.

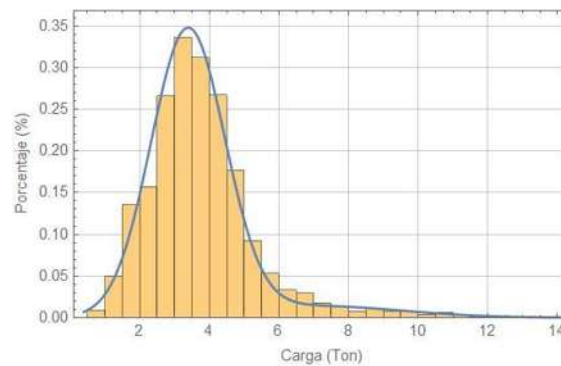
Tabla 6.- Módulos Corregidos y Tipo de Asfalto.

Datos de campo		Módulo Corregido por Contenido de Agua y Temperatura (kg/cm <sup>2</sup> )
Capas	Espesores (cm)	
Carpeta	6.4	34289.1
Base	23	5006.7
Subbase	30	4460.12
Subrasante	30	931.37
Tipo de Asfalto		64-22

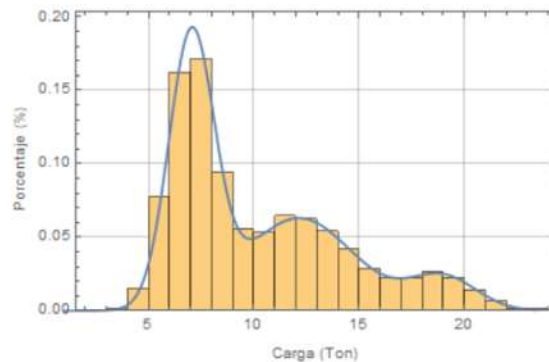
Para fines de diseño se solicitaron al Instituto Mexicano del Transporte (IMT), espectros de carga representativos del estado de Michoacán, para los diferentes tipos de ejes (sencillo, tándem y tridem). Los datos correspondientes a dichos espectros de carga, se determinaron a partir de estaciones de pesaje móviles (WIM) instaladas en puntos relativamente cercanos a la zona de estudio. Los espectros de carga empleados en este trabajo de investigación se presentan en la Figura 35, Figura 36 y Figura 37. El número promedio por año para cada tipo de eje de carga es el que se indica en la Tabla 7.

**Tabla 7.-Número de Repeticiones por Año Esperado para Cada Tipo de Eje.**

Tipo de Eje	Número de Repeticiones Esperado por Año	Porcentaje de Repeticiones
Sencillo	786,804.40	51.42
Tándem	683,448.19	44.67
Tridem	59,877.99	3.91
Total	1,530,130.66	100



**Figura 35.- Espectro de Carga Eje Sencillo.**



**Figura 36.- Espectro de Carga Eje Tándem.**

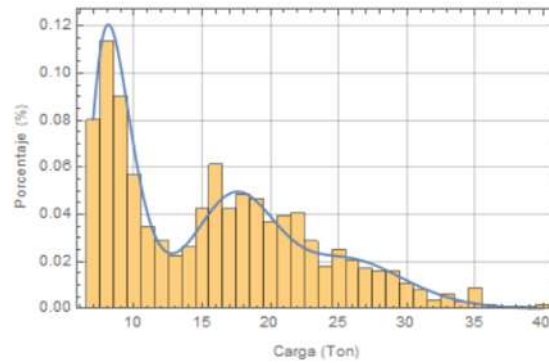


Figura 37.- Espectro de Carga Eje Tridem.

A partir de los datos de los espectros de carga de cata tipo de eje, se realizó un ajuste para cada espectro mediante el empleo de ciertas técnicas probabilísticas que permitieron determinar el comportamiento y la función de distribución de probabilidad que los describe, para de esta manera analizar su variabilidad. Con base en lo anterior, se pudo generar aleatoriedad dentro de la muestra representativa del tránsito y así poder llevar a cabo el análisis estocástico. En la Figura 35, 36 y 37, se muestran los ajustes encontrados. Cabe mencionar que se generan los tres mejores ajustes para cada espectro, de los cuales sólo se permite la selección de uno y es con el que se realiza el diseño.

Para llegar a cierto grado de certeza en el diseño de la estructura del pavimento flexible, se emplea el parámetro de confiabilidad. Lo anterior con la finalidad de asegurar que la alternativa de sección estructural del pavimento dure como mínimo el periodo para el cual fue diseñado. Con la finalidad de asegurar un diseño estable se selecciona el nivel de confianza del 85%, su valor correspondiente se muestra en la Figura 38 y en la Tabla 1.

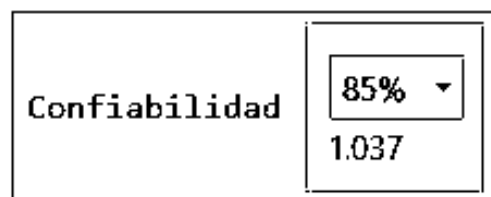


Figura 38.- Nivel de Confianza.

Una vez realizados los cálculos correspondientes del análisis probabilístico, se obtiene como producto final una tabla que indica la vida útil mediante el número de repeticiones de carga y los años necesarios para que se cumplan dichas repeticiones. Los cuales son necesarios para que la capa de carpeta asfáltica presente fallas por fatiga y que las capas granulares presenten fallas por deformación permanente. Para el caso de las funciones de transferencia de desempeño del pavimento de tipo general, se determina únicamente el número de repeticiones para fatiga de la carpeta asfáltica y el número de repeticiones por deformación permanente de la subrasante como se muestra en la Tabla 8. Mientras que para las funciones de transferencia deducidas por el método de la UNAM permiten determinar el número de repeticiones para presentar fallas por fatiga de la

carpeta asfáltica y el número de repeticiones por deformación permanente de todas las capas granulares involucradas como se muestra en la Tabla 9.

**Tabla 8.- Vida Útil para Fatiga de la Carpeta Asfáltica y para Deformación Permanente de la Subrasante Mediante la Función General.**

Selección del Modelo Datos de Entrada Ajuste de Espectros de Carga Análisis Probabilístico Histogramas  
Nivel de Confianza Ejecutar Cálculos Resultados

Vida Útil	Nº de Repeticiones de Carga	Años
Fatiga	$1.7309 \times 10^5$	1.13121
Deformación Permanente en la Subrasante	$1.22434 \times 10^5$	0.800156

**Tabla 9.-Vida Útil para Fatiga de la Carpeta Asfáltica y para Deformación Permanente de la Subrasante Mediante la Función deducida de la UNAM para Altas Especificaciones.**

Selección del Modelo Datos de Entrada Ajuste de Espectros de Carga Análisis Probabilístico Histogramas  
Nivel de Confianza Ejecutar Cálculos Resultados

Vida Útil	Nº de Repeticiones de Carga	Años
Fatiga	0.436562	0.115976
Deformación Permanente en la Base Granular	106.162	20.5381
Deformación Permanente en la Subbase	349.625.	267.933
Deformación Permanente en la Subrasante	226.592.	253.267

### 5.7.1 Análisis de Histogramas del Caso de Estudio

En los histogramas de la Figura 39, se muestran la acumulación de la vida útil por fatiga de la carpeta asfáltica para cada uno de los tipos de ejes. En ellos podemos observar el valor medio del número de repeticiones de carga predichas ( $N_f$ ) al que tiende el diseño por fatiga de la carpeta. La distribución de los datos muestra una forma asimétrica a la derecha (pocos datos en el lado derecho), lo cual es un indicio de falla prematura por fatiga de la carpeta asfáltica (Minitab®, 2018).

Tanto el histograma para el eje sencillo como para el eje tándem presentan una distribución con una cola larga hacia la derecha, es decir muestra un sesgo positivo. Dicho histograma presenta una alta densidad hacia la parte izquierda, lo que nos dice que las repeticiones de carga son bajas; cómo podemos observar, para el histograma de eje sencillo el valor medio del número de repeticiones predichas ronda 4.2 millones, mientras que para el eje tándem oscila las 1.5 millones de repeticiones. Sin embargo, para el eje sencillo su rango de distribución es más elevado en comparación con histograma del eje tándem. Esto se debe a que el espectro de carga para eje sencillo utilizado en este análisis probabilístico, se comporta de manera adecuada, es decir, el rango de valores de carga de dicho espectro oscila por debajo del valor máximo de 11 Toneladas permitido por la Norma Oficial de Pesos y Dimensiones de 2017. El tercer histograma presenta una distribución asimétrica hacia la derecha, con una distribución más amplia, pero el valor medio de vida útil predicha se sitúa en 2.5 millones de repeticiones.



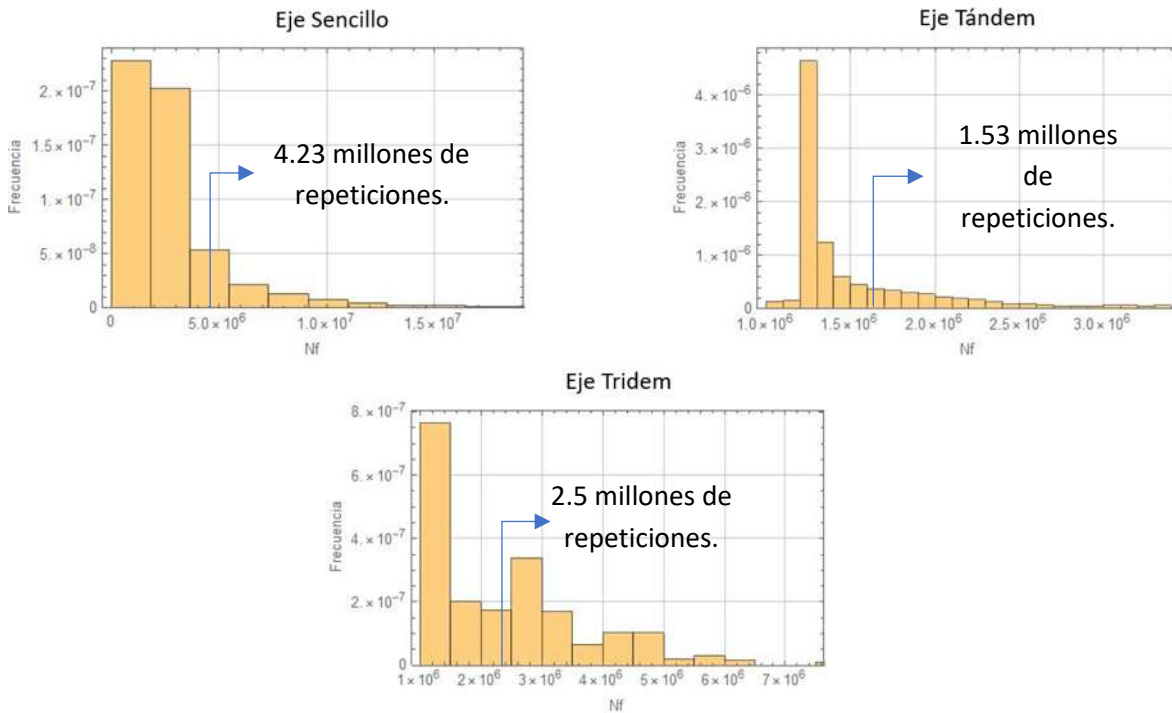


Figura 39. Histogramas de Vida Útil por Fatiga.

Como podemos observar en la Figura 39, las medias respectivas a cada eje se presentan desfasadas visualmente; la razón por la que se comporta de esa manera se puede deducir de la Figura 40, en donde se muestran los diagramas de caja y bigote para cada tipo de eje. A partir de estos diagramas podemos obtener abundante información de la distribución de datos mostrados en la Figura 39. En el diagrama de eje tándem vemos como la parte superior de la caja es mayor que la inferior; ello quiere decir que los datos de repeticiones de cargas predichos comprendidos entre el 50% y el 75% de la muestra están más dispersos que los datos que se encuentran entre el 25% y el 50%. También podemos apreciar que el bigote inferior que va de  $X_{\min}$  a  $Q_1$  es más corto que el superior; por ello el 25% de los datos de las repeticiones de carga bajas están más concentrados que el 25% de las repeticiones de cargas altas. Además, el rango intercuartílico  $Q_3 - Q_1 = 409,322.0$ ; es decir, el 50% de los datos se presentan en 409,322 repeticiones de carga. Por último, podemos observar la presencia de datos atípicos (marcas rojas y azules) que se generan al momento de la aplicación del modelo del sistema; la presencia de estos datos atípicos ocasiona que la media se desplace hacia la caja superior (corresponde a la derecha en la Figura 39).

El diagrama del eje tridem de la Figura 40 presenta un comportamiento de caja y bigote similar al del eje tándem. En donde podemos apreciar un comportamiento asimétrico hacia la caja superior (lado derecho en la Figura 39). A diferencia de los ejes sencillos y tándem, en este se presentan únicamente 3 datos atípicos; y a partir de ello podemos apreciar en la Figura 39 que la media se presenta dentro de las repeticiones de carga con mayor frecuencia.

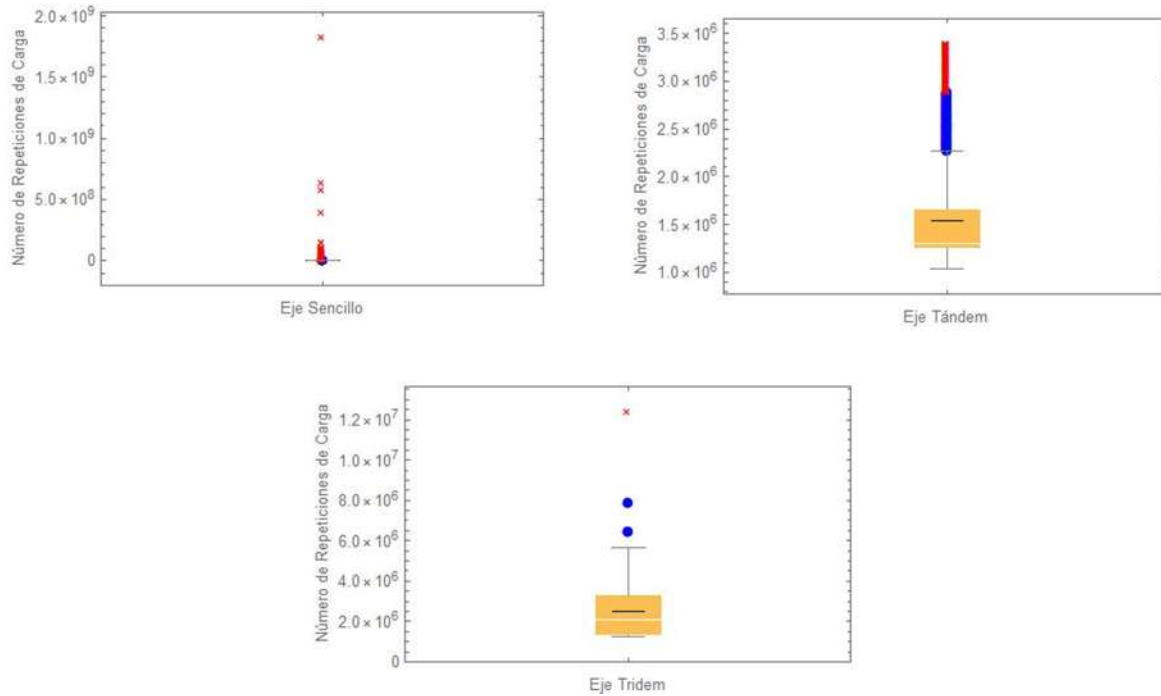


Figura 40.- Diagrama de Caja y Bigote de la Vida Útil por Fatiga.

En la Figura 41 se muestran los histogramas de daño por fatiga de la carpeta asfáltica ( $D_{if}$ ). En ellos podemos observar el comportamiento del daño producido por cada tipo de eje sobre la carpeta asfáltica, así como también podemos observar el valor medio del daño individual para cada tipo de eje. El histograma de eje sencillo no presenta una distribución normal y tampoco cubre los requerimientos de una distribución asimétrica, se puede observar que el daño ocasionado por el paso de los ejes sencillos tiene un comportamiento relativamente bajo. El histograma de daño por fatiga para eje tándem muestra un comportamiento contrario a su histograma de vida útil, debido a que el daño producido por el paso de dichos vehículos presenta una magnitud baja. El histograma del eje tridem presenta un comportamiento bimodal, lo que indica que el paso de cualquiera de los ejes tridem utilizados dañan en gran medida la carpeta asfáltica.

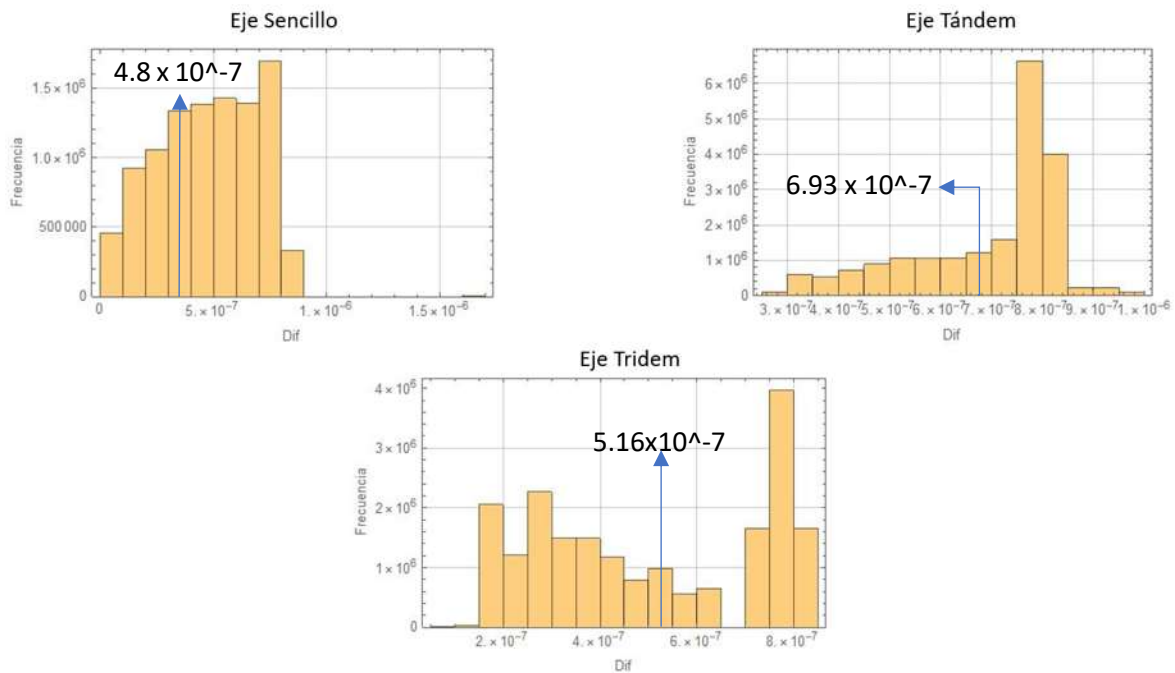


Figura 41.- Histogramas de Daño por Fatiga.

En la Figura 42 se muestran los diagramas de caja y bigote del daño por fatiga para cada tipo de eje, en donde podemos apreciar que el comportamiento de las cajas para eje sencillo es de forma simétrica y dentro de ellas se muestra con una línea negra donde se presenta la media. También podemos apreciar que el bigote superior que va de  $X_{m\acute{a}x}$  a  $Q_3$  es más corto que el inferior; por ello el 25% de los datos que representan los daños elevados están más concentrados que el 25% de los daños con magnitudes bajas. Para el caso del eje tándem podemos observar que la caja inferior es mayor que la superior; ello quiere decir que los daños generados por la simulación y comprendidos entre el 25% y el 50% de la muestra están más dispersos que los datos que se encuentran entre el 50% y el 75%. También podemos apreciar que el bigote superior que va de  $X_{m\acute{a}x}$  a  $Q_3$  es más corto que el inferior; por ello el 25% de los datos que representan los daños elevados están más concentrados que el 25% de los daños con magnitudes bajas. Además, el rango intercuartílico  $Q_3 - Q_1 = 1.96775 \times 10^{-7}$ ; es decir, el 50% de los datos se presentan en  $1.96775 \times 10^{-7}$ . Por último, podemos observar la presencia de una pequeña cantidad de datos atípicos (marcas azules) que se generan al momento de la aplicación del modelo del sistema; la presencia de estos datos atípicos no impacta de manera substancial el comportamiento de la media. Sin embargo, si observamos el diagrama la media se posiciona en la caja inferior debido a el 50% de los datos se presentan en  $1.96775 \times 10^{-7}$ .

Por último, el diagrama del eje tridem presenta una mayor dispersión en los datos que se encuentran entre el 50% y 75%. También podemos apreciar que el bigote superior que va de  $X_{m\acute{a}x}$  a  $Q_3$  es más corto que el inferior; por ello el 25% de los datos que representan los daños elevados están más concentrados que el 25% de los daños con magnitudes bajas. Además, como se puede observar no se tiene presencia de datos atípicos dentro de la información generada. Sin embargo,

vemos como la media se posiciona dentro de la caja superior y se debe a que los datos comprendidos del 75% hacia delante se encuentra más concentrados.

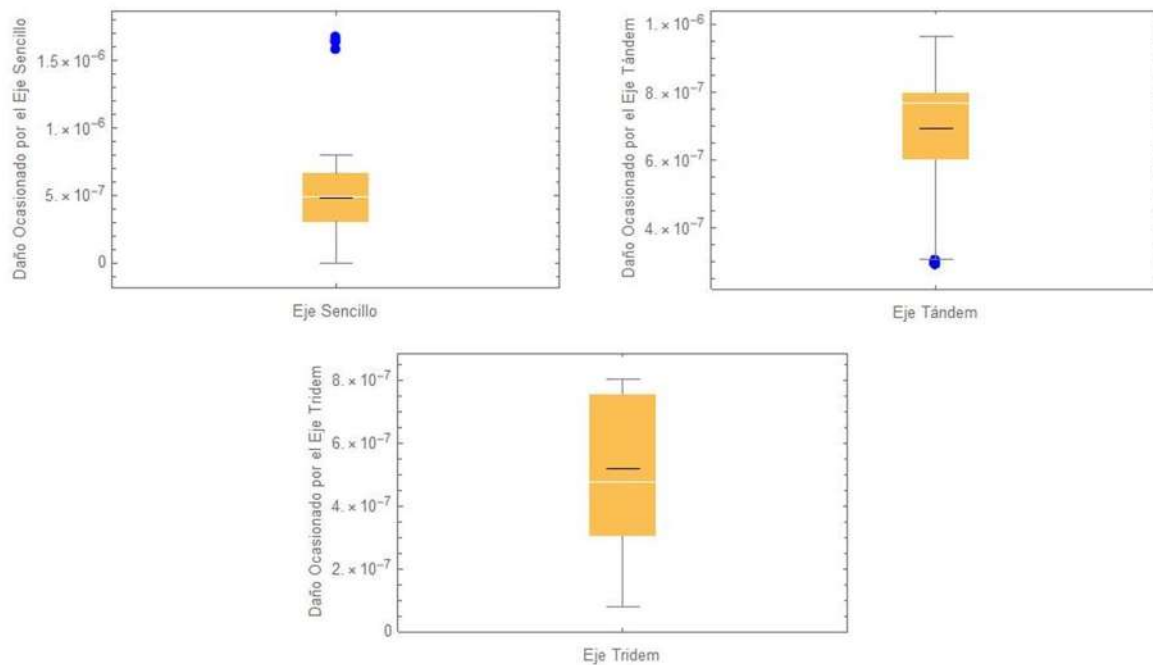


Figura 42.- Diagrama de Caja y Bigote del Daño por Fatiga.

Ya que se cuenta con los valores de los daños individuales ( $D_i$ ) para cada tipo de eje y para cada repetición de carga, se procede a determinar el daño total ( $D_{total}$ ) realizando la sumatoria de cada daño individual producido por cada repetición de cara y para cada uno de los tipos de ejes. Para este caso de estudio se muestra la Tabla 10 con los valores de los daños totales por fatiga para cada tipo de eje.

Tabla 10.- Daños por Fatiga para Cada Tipo de Eje.

Tipo de Eje	Porcentaje de Ejes	Daño Total por Fatiga por Eje	Número de Repeticiones por Tipo de Eje
Eje Sencillo	51.42	0.002452520	741,101.57
Eje Tandem	44.67	0.00309867	936,354.94
Eje Tridem	3.91	0.000201448	60,873.48

De acuerdo con la metodología desarrollada en esta tesis el número total de repeticiones para llegar a la falla ( $n$ ) para la estructura de pavimento analizada y los espectros de carga empleados se obtiene escalando el daño a un valor crítico de 1.0, aplicando la ecuación (23). Por lo tanto, el número de repeticiones permitidas por la estructura analizada es:

$$n = \frac{1.0 * 10000}{0.00575264} = 1.73833 \times 10^6 \text{ repeticiones de carga de los tres tipos de ejes.}$$

Como podemos observar, el número total de repeticiones para llegar a la falla (n) por fatiga de la carpeta asfáltica es aproximadamente igual al valor determinado por nuestra metodología y presentado en la Tabla 8.

En los histogramas de la Figura 43 se muestran la acumulación de la vida útil por deformación permanente ( $N_d$ ) de las capas granulares para cada uno de los tipos de ejes. En ellos podemos observar el número de repeticiones de carga al que tiende el diseño por deformación permanente. La distribución de los datos muestra una forma asimétrica a la derecha, lo cual es un indicio de falla muy prematura por deformación permanente.

Tanto el histograma para el eje sencillo como el histograma para eje tándem presentan una distribución con una cola larga hacia la derecha, es decir muestran un sesgo positivo. Dicho histograma presenta una alta densidad hacia la parte izquierda, lo que nos dice que las repeticiones de carga bajas se repiten con mayor frecuencia. El hecho de que se presente una falla prematura por deformación permanente se debe principalmente a que la condición de humedad reduce en gran medida la capacidad de carga de las capas, permitiendo que se presenten deformaciones permanentes a temprana edad del pavimento. Para el caso de los histogramas para ejes tándem y tridem, una de las causas por las que presentan un valor bajo de repeticiones de carga (además del contenido de humedad) es debido a que las cargas sobrepasan el valor normado por la Norma Oficial de Pesos y Dimensiones de 2017 y que es de 18 Toneladas y 23.5 Toneladas respectivamente.

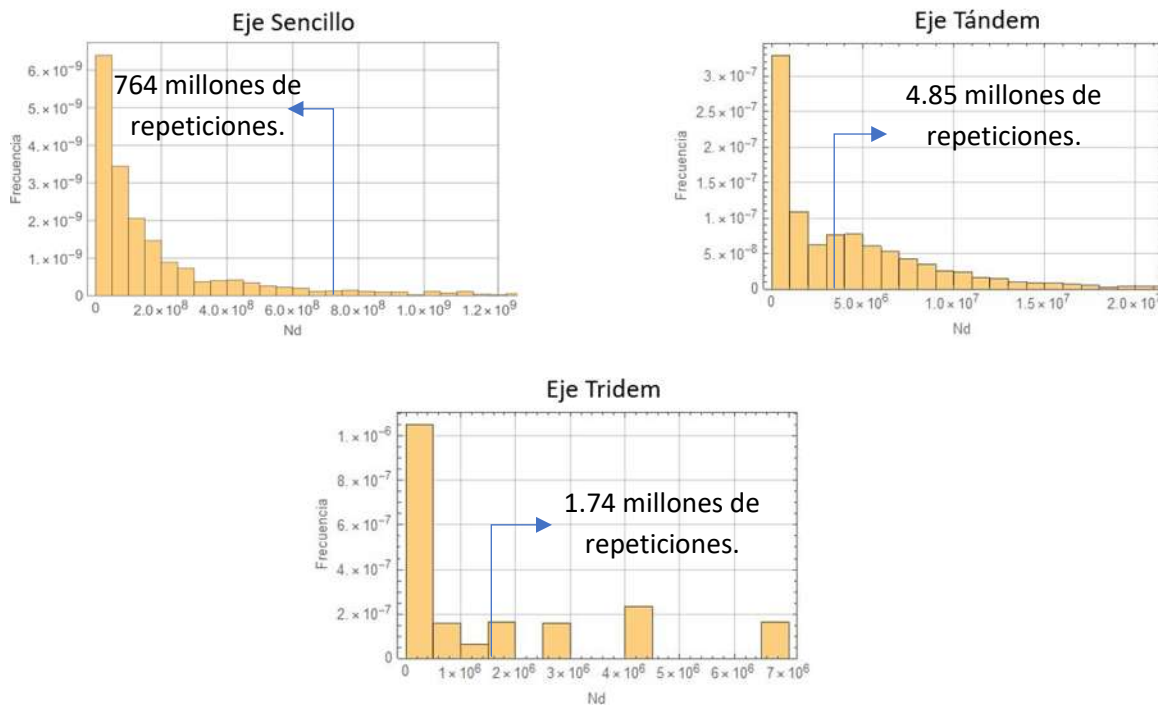


Figura 43.- Histogramas de Vida Útil por Deformación Permanente.

Como podemos observar en la Figura 43, el valor medio de vida útil por deformación permanente del eje sencillo es de 764 millones de repeticiones; la razón por la que se comporta de esa manera se puede apreciar en la Figura 44 en donde se muestran los valores atípicos que existen en el número de repeticiones predichos y donde el valor máximo es de  $7.6 \times 10^{11}$ . Esto genera que la media se desplace hacia la derecha y adquiera un valor muy elevado.

En el diagrama de eje tándem la parte superior de la caja es mayor que la inferior; ello quiere decir que los datos de repeticiones de cargas predichos comprendidos entre el 50% y el 75% de los mismos están más dispersos que los datos que se encuentran entre el 25% y el 50%. También podemos apreciar que el bigote inferior que va de  $X_{mín}$  a  $Q_1$  es más corto que el superior; por ello el 25% de los datos de las repeticiones de carga bajas están más concentrados que el 25% de las repeticiones de cargas altas. Además, el rango intercuartílico  $Q_3 - Q_1 = 5.87 \times 10^6$ ; es decir, el 50% de los datos se presentan en  $5.87 \times 10^6$  repeticiones de carga. Por último, podemos observar la presencia de una gran cantidad de datos atípicos (marcas rojas y azules) que se generan al momento de la aplicación del modelo del sistema; la presencia de estos datos atípicos ocasiona que la media se desplace hacia la caja superior (lado derecho en la Figura 43).

El diagrama del eje tridem de la Figura 44 podemos apreciar un comportamiento asimétrico hacia la derecha como se presenta de igual manera en el eje tridem de la Figura 43. A diferencia de los

ejes sencillos y tándem, en este se presentan escasos datos atípicos; y a partir de ello podemos apreciar en la Figura 43 que la media se presenta dentro de las repeticiones de carga con mayor frecuencia.

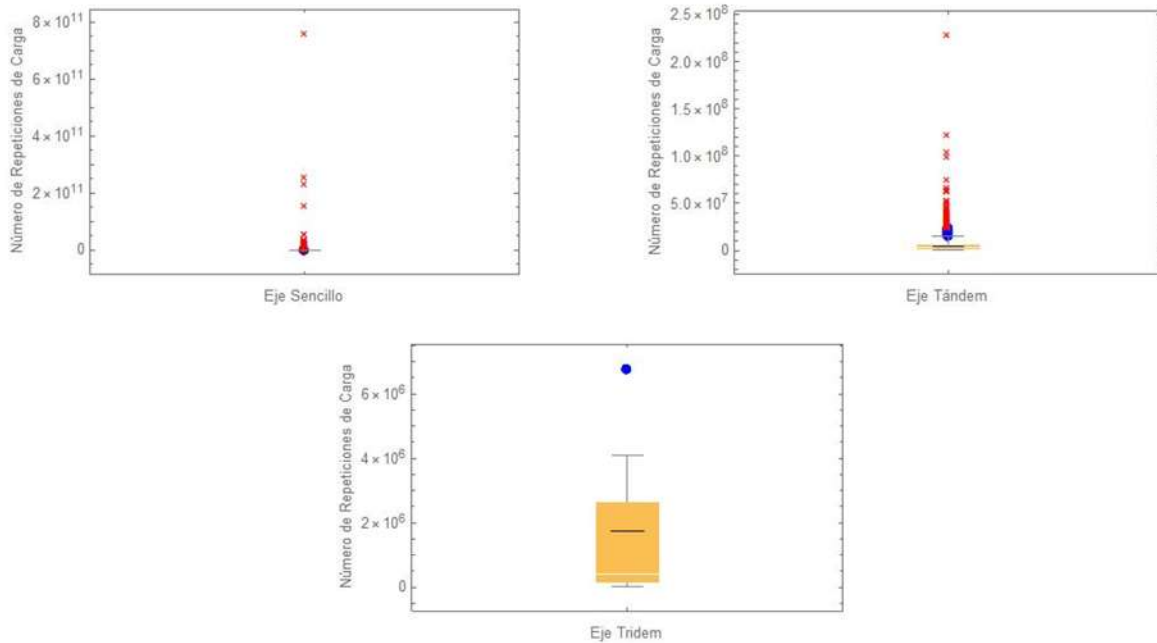


Figura 44.- Diagrama de Caja y Bigote de la Vida Útil por Deformación Permanente.

En la Figura 45 se presentan los histogramas de daño por deformación permanente correspondientes a la capa de subrasante para los diferentes tipos de ejes. En ellos podemos apreciar una distribución de cola larga hacia la derecha, esto nos indica que el daño se presenta de manera prematura al paso de los diferentes tipos de ejes.

La magnitud del daño se incrementa para los ejes tándem y tridem en donde la carga del eje es más elevada. Así pues, de acuerdo con las condiciones *in-situ*, el paso de las cargas del eje tándem ocasiona un daño severo a las capas granulares, acelerando de esta manera la presencia de deformaciones permanentes en la estructura del pavimento analizado.

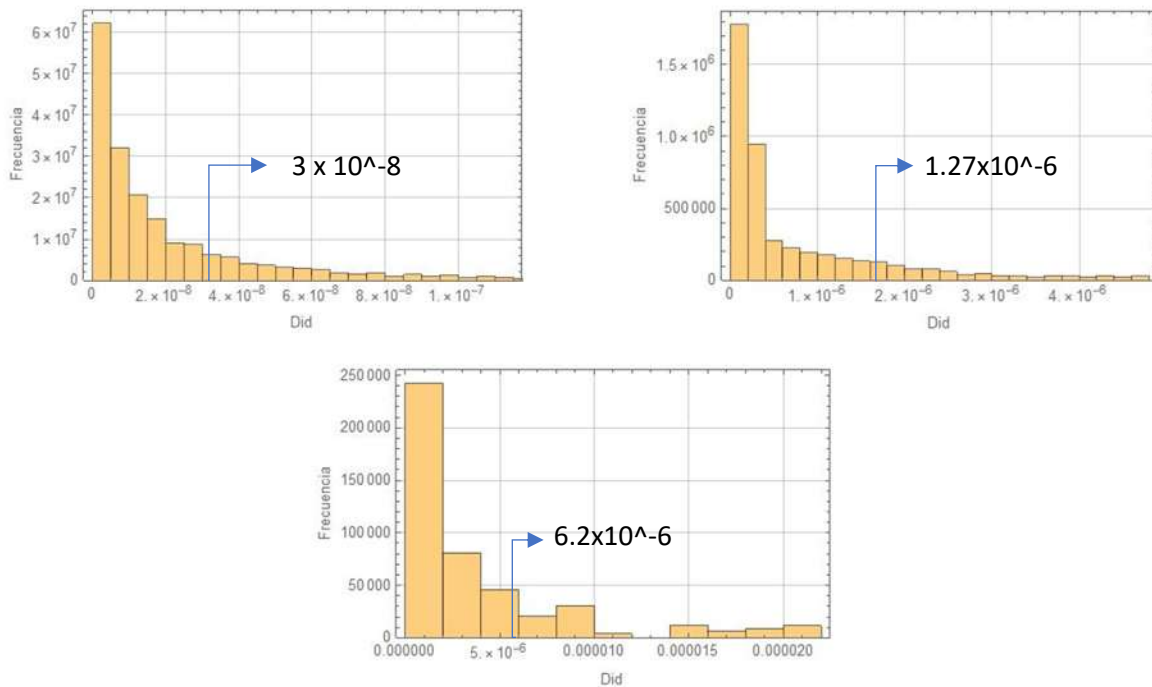


Figura 45.- Histogramas de Daño por Deformación Permanente en la Capa de Subrasante.

En la Figura 46 se muestran los diagramas de caja y bigote para cada tipo de eje, en donde podemos apreciar que el comportamiento de las cajas para los tres tipos de ejes es de forma asimétrica y dentro de ellas se muestra con una línea negra donde se presenta la media. También podemos apreciar que el bigote superior que va de  $X_{\text{máx}}$  a  $Q_3$  es más corto que el inferior; por ello el 25% de los datos que representan los daños elevados están más concentrados que el 25% de los daños con magnitudes bajas. Se puede observar que la caja superior es mayor que la inferior; ello quiere decir que los daños generados por la simulación y comprendidos entre el 50% y el 75% de ellos están más dispersos que los datos que se encuentran entre el 25% y el 50%. También podemos apreciar que el bigote inferior que va de  $X_{\text{mín}}$  a  $Q_1$  es más corto que el superior; por ello el 25% de los datos que representan los daños menores están más concentrados que el 25% de los daños con magnitudes altas. Por último, podemos observar la presencia de una elevada cantidad de datos atípicos (marcas azules y rojas) que se generan al momento de la aplicación del modelo del sistema; la presencia de estos datos atípicos impacta de manera substancial en el comportamiento de la media.



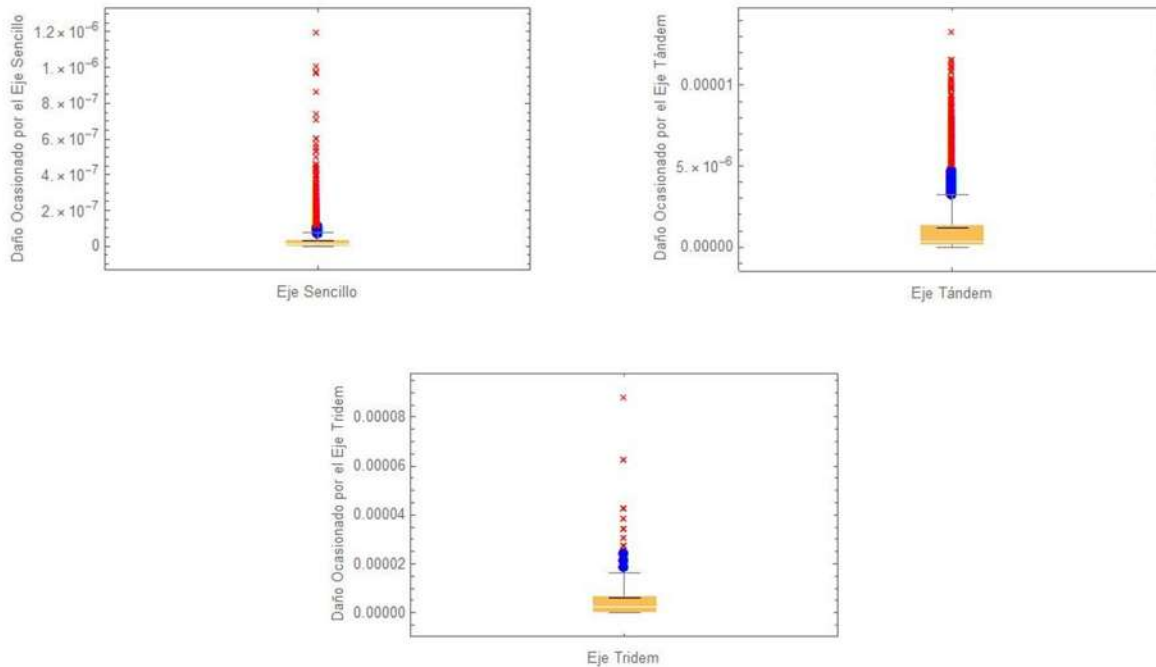


Figura 46.- Diagrama de Caja y Bigote del Daño por Deformación Permanente.

Ya que se cuenta con los valores de los daños individuales ( $D_{id}$ ) por deformación permanente para cada tipo de eje y para cada repetición de carga, se procede a determinar el daño total ( $D_{total}$ ) realizando la sumatoria de cada daño individual producido por cada repetición de cara y para cada uno de los tipos de ejes. Para este caso de estudio se muestra la Tabla 11 con los valores de los daños totales por fatiga para cada tipo de eje.

Tabla 11.-Daños por Deformación Permanente para Cada Tipo de Eje.

Tipo de Eje	Porcentaje de Ejes	Daño Total por Deformación Permanente por Eje	Número de Repeticiones por Tipo de Eje
Eje Sencillo	51.42	0.000158000	25,655.34
Eje Tandem	44.67	0.00527289	857,056.55
Eje Tridem	3.91	0.00241293	392,198.10

De acuerdo con la metodología desarrollada en esta tesis el número total de repeticiones para llegar a la falla ( $n$ ) para la estructura de pavimento analizada y los espectros de carga empleados se obtiene escalando el daño a un valor crítico de 1.0, aplicando la ecuación (23). Por lo tanto, el número de repeticiones permitidas por la estructura analizada es:

$$n = \frac{1.0 * 10000}{0.00784366} = 1,274,910 \text{ repeticiones de carga de los tres tipos de ejes.}$$

Como podemos observar, el número total de repeticiones para llegar a la falla (n) por deformación permanente es bastante aproximado al valor determinado por nuestra metodología y presentado en la Tabla 8. En la Tabla 12 se presenta un resumen con los daños causados por los diferentes tipos de ejes, así como el número de repeticiones esperados por eje y el número total de repeticiones admisibles de acuerdo con la metodología descrita.

**Tabla 12.- Resumen de Daños y Número de Repeticiones.**

Tipo de Eje	Porcentaje de Ejes	Daño Total por Fatiga por Eje	Número de Repeticiones por Tipo de Eje	Daño Total por Deformación Permanente por Eje	Número de Repeticiones por Tipo de Eje
Eje Sencillo	51.42	0.002452520	741,101.57	0.000158000	25,655.34
Eje Tándem	44.67	0.00309867	936,354.94	0.00527289	857,056.55
Eje Tridem	3.91	0.000201448	60,873.48	0.00241293	392,198.10
Total	100	0.00575264	1,738,330.00	0.00784366	1,247,910.00

## 5.8 Alternativa de Mejoramiento de la Estructura de Pavimento Flexible Analizada

En este apartado, se describe la implementación de una solución para el mejoramiento de la estructura de pavimento analizada anteriormente. Dicho mejoramiento, está orientado a incrementar el estándar funcional de la estructura de pavimento existente. Las intervenciones de mejoramiento pueden darse de tipo funcional cuando no contribuyen al mejoramiento de la capacidad estructural del camino, o de tipo estructural, cuando su objetivo primordial es aumentar la capacidad del tramo en estudio de soportar las cargas del tránsito.

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 en particular, se propone modificar los espesores de las capas de carpeta asfáltica y base granular como se muestra en la Figura 47. Así mismo, se propone mejorar la resistencia de las capas al elevar los valores de módulos tanto dinámico como el de rigidez, siempre y cuando cumplan lo estipulado en la Normativa SCT (ver Figura 48). Para esta alternativa propuesta, la expectativa de vida que debe cumplir el diseño es de 15 años. Lo anterior debido a las condiciones y características particulares del camino del camino mencionadas en el apartado 5.7.

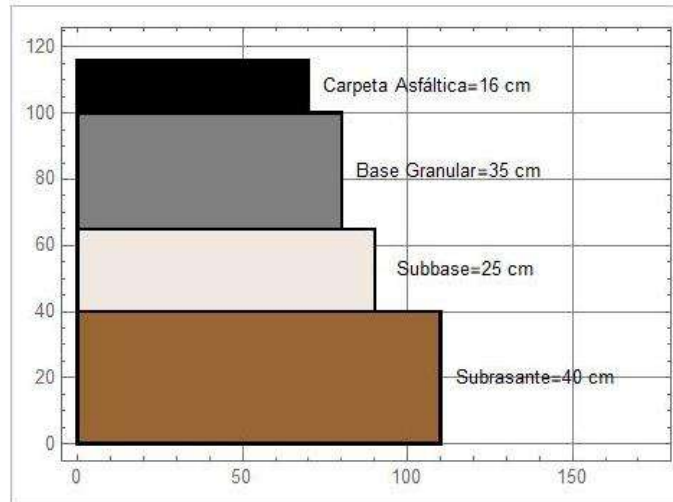


Figura 47.- Alternativa de Estructura de Pavimento Flexible.

<p><b>Módulo Dinámico (kg/cm<sup>2</sup>)</b></p> <p>Longitud: <input type="text" value="-101.345"/></p> <p>Latitud: <input type="text" value="19.499"/></p> <p>Porcentaje Retenido en la Malla 3/4: <input type="text" value="0.8"/></p> <p>Porcentaje Retenido en la Malla 3/8: <input type="text" value="0.53"/></p> <p>Porcentaje Retenido en la Malla N°4: <input type="text" value="0.39"/></p> <p>Porcentaje Retenido en la Malla N°200: <input type="text" value="0.02"/></p> <p>Frecuencia de Aplicación de la Carga (Hertz): <input type="text" value="25"/></p> <p>Volumen de Aire (%): <input type="text" value="4.6"/></p> <p>Volumen Efectivo de Asfalto (%): <input type="text" value="15.7"/></p> <p><input type="button" value="Corrección por Temperatura"/></p>	<p><b>Modulo Resiliente (kg/cm<sup>2</sup>)</b></p> <p>Base Granular: <input type="text" value="3265.45"/></p> <p>Desviación Estándar (<math>\sigma</math>): <input type="text" value="0.2"/></p> <p>Peso Específico de la Base (<math>\gamma_m</math>): <input type="text" value="1865.93"/></p> <p>Índice Plástico de la Base(IP): <input type="text" value="0"/></p> <p>Contenido de Humedad Óptimo de la Base (Wopt): <input type="text" value="0.1"/></p> <p>Contenido de Humedad de la Base (w): <input type="text" value="0.1088"/></p> <p>Peso Específico Seco Máximo (<math>\gamma_{dmax}</math>): <input type="text" value="1682.83"/></p> <p>Gravedad Específica: <input type="text" value="2.3"/></p> <p>D60: <input type="text" value="0.8"/></p> <p>Porcentaje Retenido en la Malla N°200: <input type="text" value="0.02"/></p> <p>Distancia del Nivel de Aguas Freáticas (NAF): <input type="text" value="0"/></p> <p><input type="button" value="Corregir Módulo Resiliente de la Base"/></p>
<p><b>Modulo Resiliente (kg/cm<sup>2</sup>)</b></p> <p>Subbase: <input type="text" value="2793.22"/></p> <p>Desviación Estándar (<math>\sigma</math>): <input type="text" value="0.2"/></p> <p>Peso Específico de la Subbase (<math>\gamma_m</math>): <input type="text" value="1810"/></p> <p>Índice Plástico de la Subbase(IP): <input type="text" value="0"/></p> <p>Contenido de Humedad Óptimo de la Subbase (Wopt): <input type="text" value="0.16"/></p> <p>Contenido de Humedad de la Subbase (w): <input type="text" value="0.11"/></p> <p>Peso Específico Seco Máximo de la Subbase(<math>\gamma_{dmax}</math>): <input type="text" value="1630.63"/></p> <p>Gravedad Específica de la Subbase: <input type="text" value="2.3"/></p> <p>D60: <input type="text" value="0.5"/></p> <p>Porcentaje Retenido en la Malla N°200: <input type="text" value="0.02"/></p> <p>Distancia del Nivel de Aguas Freáticas (NAF): <input type="text" value="0"/></p> <p><input type="button" value="Corregir Módulo Resiliente de la Subbase"/></p>	<p><b>Modulo Resiliente (kg/cm<sup>2</sup>)</b></p> <p>Subrasante: <input type="text" value="2283.75"/></p> <p>Desviación Estándar (<math>\sigma</math>): <input type="text" value="0.2"/></p> <p>Peso Específico de la Subrasante (<math>\gamma_m</math>): <input type="text" value="1793.83"/></p> <p>Índice Plástico de la Subrasante(IP): <input type="text" value="18"/></p> <p>Contenido de Humedad Óptimo de la Subrasante (Wopt): <input type="text" value="0.26"/></p> <p>Contenido de Humedad de la Subrasante (w): <input type="text" value="0.1255"/></p> <p>Peso Específico Seco Máximo de la Subrasante (<math>\gamma_{dmax}</math>): <input type="text" value="1593.8"/></p> <p>Gravedad Específica de la Subrasante : <input type="text" value="2.3"/></p> <p>D60: <input type="text" value="0.5"/></p> <p>Porcentaje Retenido en la Malla N°200: <input type="text" value="0.02"/></p> <p>Distancia del Nivel de Aguas Freáticas (NAF): <input type="text" value="0"/></p> <p><input type="button" value="Corregir Módulo Resiliente de la subrasante"/></p>

Figura 48.- Propiedades de los Materiales de la Mezcla Asfáltica y de las Capas Granulares para la Alternativa de Mejoramiento.

Una vez introducidos los datos referentes a cada una de las capas de la estructura del pavimento, se procedió a realizar sus respectivas correcciones. En la siguiente tabla se muestra los valores corregidos empleados para el análisis.

Tabla 13.- Propiedades de los Materiales de la Mezcla Asfáltica y de las Capas Granulares para la Alternativa de Solución.

Datos de campo		
Capas	Espesores Reales (cm)	Módulo Dínamico y Módulo Resiliente (kg/cm <sup>2</sup> )
Carpeta	15	44000
Base	35	6373.7
Subbase	25	5546.42
Subrasante	40	2128.63
Tipo de Asfalto		64-22

La alternativa propuesta permite que los esfuerzos producidos por las cargas del tránsito se reduzcan considerablemente, permitiendo que las deformaciones verticales producidas por los vehículos que transitan en la vía no superen valores máximos permitidos para las condiciones de servicio esperadas en el tramo analizado. En la Tabla 14 se muestran los resultados obtenidos para la alternativa de mejoramientos propuesta, en ella podemos observar que la vida útil para llegar a la falla por fatiga se incrementa aproximadamente 16.5 veces con respecto a los resultados obtenidos en la Tabla 8. Para el caso la vida útil por deformación permanente, con la mejora propuesta se incrementa 46 veces con respecto a los obtenidos antes de la alternativa propuesta.

**Tabla 14.- Número de Repeticiones de Carga para Fatiga de la Carpeta Asfáltica y para Deformación Permanente de la Subrasante para la Alternativa de Mejoramiento.**

Selección del Modelo Datos de Entrada Ajuste de Espectros de Carga Análisis Probabilístico Histogramas

Nivel de Confianza Ejecutar Cálculos Resultados

Vida Útil	Nº de Repeticiones de Carga	Años
Fatiga	$2.85526 \times 10^7$	18.6602
Deformación Permanente en la Subrasante	$5.6429 \times 10^7$	36.8785

## 5.9 Comparativa de Métodos de Diseño

Con el propósito de realizar una comparación entre las metodologías 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 nuestra metodología desarrollada en este trabajo de investigación. La estructura de pavimento que se tomó como referencia para realizar las comparaciones es la mostrada en la Figura 33, las propiedades de los materiales que se tomaron para los análisis corresponden a los mostrados en la Figura 34. En la Tabla 15, 16 y 17 se muestran diferentes cuadros comparativos de los elementos que considera cada uno de los métodos para el diseño del pavimento flexible, y a partir de ello, se pueden analizar las diferencias que existen entre uno y otro. A continuación, se describen con detalle.

Para la Tabla 15 se muestra el cuadro comparativo para la condición del tránsito, en él podemos observar que el IMT-PAVE utiliza espectros representativos de la República Mexicana para realizar el diseño del pavimento flexible. Si se conocen con precisión los datos de pesaje, se pide ingresar 36 valores estadísticos que modelan los espectros de carga. Para el caso del PerRoad, no considera el dato correspondiente al horizonte de proyecto, sin embargo, si estima la vida útil en años; así mismo, el diseño se lleva a cabo mediante el uso de espectros de carga o de clasificación vehicular pero no ambos. Con lo cual, determina de una manera diferente los porcentajes y número de repeticiones por tipo de eje y por año de análisis. Ya que no toma en cuenta el horizonte de proyecto ni la clasificación vehicular para este aspecto.

Tabla 15.- Cuadro Comparativo entre los Métodos de Diseño de la Condición del Tránsito.

Método de Diseño	Condición	Funciones de Transferencia de Desempeño del Pavimento	Tránsito						
			Factor de Distribución por Carril	Factor de Distribución por Sentido	Horizonte de Proyecto	Tasa de Crecimiento	TDPA	Clasificación Vehicular	Espectros de Carga
UMSNH	Fatiga:	$N_f = 1.66^{-10} \epsilon_t^{-4.32}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Deformación Permanente:	$N_d = 6.18^{-8} \epsilon_c^{-3.95}$	Esta información la requiere para determinar los porcentajes y número de repeticiones por tipo de eje y por año de análisis.						Utiliza espectros de carga reales del tramo en estudio.
IMT-PAVE	Fatiga:	$N_f = 1.66^{-10} \epsilon_t^{-4.32}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
	Deformación Permanente:	$N_d = 6.18^{-8} \epsilon_c^{-3.95}$	Esta información la requiere para determinar los porcentajes y número de repeticiones por tipo de eje y por año de análisis.						Utiliza espectros representativos de la República Mexicana. Si se conocen con precisión los datos de pesaje, se pide ingresar 36 valores estadísticos que modelan los espectros de carga.
PerRoad	Fatiga:	$N_f = 1.66^{-10} \epsilon_t^{-4.32}$	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓
	Deformación Permanente:	$N_d = 6.18^{-8} \epsilon_c^{-3.95}$	Requiere el valor de la distribución por carril.	Requiere el valor de la distribución por sentido.	No toma en cuenta este parámetro.	Requiere el valor de la tasa de crecimiento.	Requiere el valor del TDPA.	El diseño se lleva a cabo mediante el empleo de espectros de carga, en caso de que no se conozca se determinan a través de la clasificación vehicular.	
	Determina de una manera diferente los porcentajes y número de repeticiones por tipo de eje y por año de análisis. Ya que no toma en cuenta el horizonte de proyecto ni la clasificación vehicular para este aspecto.								







Para la Tabla 16 se muestra el cuadro comparativo para la condición de las propiedades de los materiales, en él podemos observar que tanto el IMT-PAVE como el PerRoad hacen uso del coeficiente de variación para determinar la dispersión relativa de los datos de las propiedades de los materiales. En el caso del IMT-PAVE, no muestra si determina o asigna una función de distribución de probabilidad que permita comprender el comportamiento de las propiedades de los materiales. Con lo cual no conocemos la manera en que analizan este parámetro, tiene la desventaja de que no es una medida de dispersión con respecto al centro de la distribución de los datos. Mientras que para el PerRoad analiza los datos mediante una función Log-Normal o una función Normal, sin embargo, siguen empleando el coeficiente de variación.

En la Tabla 17 se muestra el cuadro comparativo para la condición del clima. en dicho cuadro, se muestra como el IMT-PAVE no toma en cuenta los efectos que el clima puede generar sobre las propiedades de los materiales tanto para la carpeta asfáltica como para las capas de suelo. De acuerdo a esto, no permite llevar a cabo un análisis completo del comportamiento de la estructura del pavimento ante las diferentes solicitaciones que se presentan. El PerRoad, contempla la corrección por temperatura del módulo dinámico de la carpeta asfáltica y contempla una variación estacional para las capas granulares.

Tabla 16.- Cuadro Comparativo entre los Métodos de Diseño de las Propiedades de los Materiales.

Método de Diseño	Propiedades de los Materiales					
	Espesores de Capas	Módulo Resiliente	Módulo Dinámico de la Carpeta Asfáltica	Media	Desviación Estándar	Confiabilidad del diseño
UMSNH	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Requiere el valor de los espesores de capas.	Requiere el valor del Mr. Además datos granulométricos y propiedades índice.	Requiere el valor del MD. Además de las propiedades del asfalto y del agregado mineral.	Requiere de estos insumos para conocer la desviación que presentan los datos de las propiedades de los materiales en su distribución respecto a la media que presentan.		Requiere este insumo para garantizar que el diseño dure como mínimo el periodo de proyecto.
IMT-PAVE	✓	✓	✓	✗	✗	✓
	Requiere el valor de los espesores de capas.	Requiere la Clasificación S.U.C.S. del Material.	Requiere únicamente el valor del Módulo Dinámico.	En su lugar emplean un coeficiente de variación para determinar la dispersión relativa de los datos de las propiedades de los materiales.		Requiere este insumo para garantizar que el diseño dure como mínimo el periodo de proyecto.
PerRoad	✓	✓	✓	✗	✗	✓
	Requiere el valor de los espesores de capas.	Requiere únicamente el valor del Mr.	Requiere el valor del Módulo Dinámico y grado PG del asfalto.	En su lugar emplean un coeficiente de variación para determinar la dispersión relativa de los datos de las propiedades de los materiales.		Requiere este insumo para garantizar que el diseño dure como mínimo el periodo de proyecto.

Tabla 17.- Cuadro Comparativo entre los Métodos de Diseño de la Condición del Clima.

Método de Diseño	Clima		Método de Simulación
	Temperatura Máxima y Mínima	Contenido de Agua	
UMSNH			Montecarlo
	Considera la temperatura máxima y mínima de la zona de estudio, para determinar el valor real del Módulo dinámico de la mezcla asfáltica.	Considera le contenido de agua de la zona de estudio, para determinar la variación en el módulo resiliente provocada por la variación del NAF.	Genera 10000 datos pseudoaleatorios a partir de este método de simulación.
IMT-PAVE			Rosenblueth
	No toma en cuenta la variación que las temperaturas máximas y mínimas generan sobre el módulo dinámico.	No toma en cuenta la variación que el contenido de agua genera sobre las capas de suelo.	Utiliza este método de simulación para proporcionar aleatoriedad al modelo de diseño.
PerRoad			Montecarlo
	Realiza una corrección por temperatura.	No toma en cuenta la variación que el contenido de agua genera sobre las capas de suelo.	Genera datos pseudoaleatorios a partir de este método de simulación.

Una vez descritos los parámetros que no consideran los métodos IMT-PAVE y PerRoad, se procedió a realizar la comparativa entre métodos de diseño. Los resultados de los diseños se muestran en la Tabla 18.



**Tabla 18.- Vida Útil en Años Realizando Corrección de los Módulos.**

Datos de Campo				
Modelo	UMSNH General	UMSNH DisPav	IMT-PAVE	PerRoad
Fatiga	1.02	0.15	< 1	0.28
Deformación Permanente	0.40	250	1.4	1.55

Posteriormente se procedió a comparar la alternativa de solución. La estructura de pavimento que se tomó como referencia para realizar las comparaciones es la mostrada en la Figura 47, las propiedades de los materiales que se tomaron para los análisis corresponden a los mostrados en la Figura 48.

**Tabla 19.- Vida Útil en Años para la Alternativa de Solución Realizando Corrección de Módulos.**

Datos de Campo				
Modelo	UMSNH General	UMSNH DisPav	IMT-PAVE	PerRoad
Fatiga	16.34	9.54	>15	1.5
Deformación Permanente	23.94	503	>15	45.2

Como podemos observar en la Tabla 18 y Tabla 19, se presentan marcadas diferencias entre los resultados de las metodologías empleadas para la revisión de una estructura de pavimento flexible, especialmente para los resultados referentes a la deformación permanente de la capa de subrasante. Estas diferencias de resultados entre la metodología desarrollada en este trabajo de investigación y los métodos IMT-PAVE y PerRoad, se presentan como consecuencia de los elementos que no consideran los métodos para el diseño del pavimento flexible IMT-PAVE 3.0 Y PerRoad.

Una vez identificadas las variaciones entre métodos, se procedió a realizar un experimento donde se tomó como parámetro variable el CBR. Ya que es el único parámetro de entrada que puede ser modificado sin variación entre los tres métodos de diseño. En dicho experimento se comparó el análisis realizado mediante una metodología determinística y el análisis debido a nuestra metodología probabilística. El experimento se realizó exclusivamente para las funciones de transferencia de desempeño del pavimento deducidas del método de la UNAM, ya que estas son las que muestran un gran salto. Como resultado del experimento mencionado se tienen las gráficas de sensibilidad mostradas en la Figura 50, Figura 51 y Figura 51.

La estructura de pavimento flexible empleada para el análisis se compone de cuatro capas compuesta de una capa de base granular, subbase, subrasante y terracerías. En la Tabla 20 se muestran los datos de la estructura que se extrajo del Instructivo para Diseño Estructural de Pavimentos Flexibles para Carreteras (Corro, Magallanes, & Prado, 1981).

**Tabla 20.- Datos Campo de las Capas de una Estructura de Pavimento Flexible (Corro, Magallanes, & Prado, 1981).**

Datos de campo		
Capas	Espesores Reales (cm)	Espesor Equivalente Sobre la Capa (cm)
Base	4	8
Subbase	10	18
Subrasante	29	47
Terracería	30	77
Tipo de Asfalto		64-22
Módulo de la Carpeta Asfáltica (kg/cm <sup>2</sup> )		35266

Para este análisis se consideran los diferentes tipos de ejes y sus cargas respectivas, así como los valores de CBR que emplean con las funciones de transferencia deducidas del método de la UNAM. El análisis se lleva a cabo para los valores de CBR permitidos por el DISPAV-5 (ver Tabla 23), los permitidos por la Normativa SCT (ver Tabla 22) y los empleados por el Instructivo para Diseño Estructural de Pavimentos Flexibles para Carreteras (ver Tabla 21). Para el caso de la Tabla 23 se empleó el valor medio de CBR para cada capa.

**Tabla 21.- Valores de CBR Utilizados en el Instructivo N° 444 (Corro, Magallanes, & Prado, 1981).**

Capa	CBR (%)
BASE GRANULAR	116
SUBBASE	20
SUBRASANTE	5
TERRACERÍA	5

**Tabla 22.- Valores de CBR Permitidos por la Normativa SCT.**

Capa	Valor Mín.
BASE GRANULAR	80
SUBBASE	60
SUBRASANTE	20
TERRACERÍA	5

**Tabla 23.- Valores de CBR Permitidos por el Dispav-5.**

Capa	Valor Máx.	Valor Mín.
BASE GRANULAR	120	80
SUBBASE	30	25
SUBRASANTE	20	15
TERRACERÍA	20	3

Una vez ingresados los parámetros de entra anteriormente descritos, se procedió a realizar la simulación de la estructura de pavimento. Los resultados obtenidos para cada variante se compararon con los mostrados en el Instructivo para Diseño Estructural de Pavimentos Flexibles para Carreteras y que se muestran en la Tabla 24.

**Tabla 24.- Vida Útil en Millones de Ejes Equivalentes.**

Capa	$\Sigma L$ (Millones)
BASE GRANULAR	6.7
SUBBASE	0.7
SUBRASANTE	0.7
TERRACERÍA	6.8

Los resultados obtenidos para cada variante (Instructivo N°444, Dispav-5 y Normativa SCT) se presentan en las tablas que se muestran a continuación:

**Tabla 25.- Vida Útil con Datos del Instructivo N°444.**

Capa	Vida Útil (Millones de Repeticiones de Carga)
BASE GRANULAR	4.98
SUBBASE	0.22
SUBRASANTE	0.94
TERRACERÍA	7.40

**Tabla 26.- Vida Útil con Datos Permitidos por Dispav-5.**

Capa	Vida Útil (Millones de Repeticiones de Carga)
BASE GRANULAR	4.95
SUBBASE	1.22
SUBRASANTE	749.18
TERRACERÍA	144.33

**Tabla 27.- Vida Útil con Datos Mínimos Permitidos por la Normativa SCT.**

Capa	Vida Útil (Millones de Repeticiones de Carga)
BASE GRANULAR	0.60
SUBBASE	40.62
SUBRASANTE	1849.18
TERRACERÍA	128.76

Como podemos observar, si ingresamos en nuestra metodología los insumos mostrados en la Tabla 20 y en la Tabla 21 obtenemos resultados cercanos (ver Tabla 25) a los estimados por el Instructivo N°444 y que se muestran en la Tabla 24. Mientras que si empleamos la información permitida por el Dispav-5 y por la Normativa SCT se obtienen saltos enormes en los resultados. Lo anterior es debido a que el método de la UNAM sólo emplea un valor para cada condición analizada, es decir, su comportamiento es determinístico; sus parámetros de tránsito y propiedades de los materiales se comportan de manera lineal al no considerar una variabilidad.

Otra manera de representar los análisis son los gráficos de la Figura 49, Figura 50 y Figura 51 en ellas se representa la variación del número de repeticiones de carga, respecto al número de iteraciones de análisis. El análisis probabilístico desarrollado en esta investigación está representado a través de una línea naranja, en donde podemos observar que el número de repeticiones de carga se ve afectado por las solicitaciones de cargas debidas al paso de  $j$  configuraciones de ejes, al transitar de manera aleatoria sobre el tramo de pavimento considerado y esta aleatoriedad está ligada con el número de iteraciones empleado para la generación pseudoaleatoria de datos en cada muestra. Lo anterior permite observar que los resultados se comportan de manera variable a través del tiempo. Y este comportamiento se debe a que el modelo analiza mediante la generación de  $i$ -iteraciones las diferentes propiedades y condiciones para un tramo de pavimento flexible, es decir, para cada iteración se generan de manera pseudoaleatoria condiciones de contenido de agua, temperatura y propiedades de los materiales en un instante de tiempo ( $t$ ).

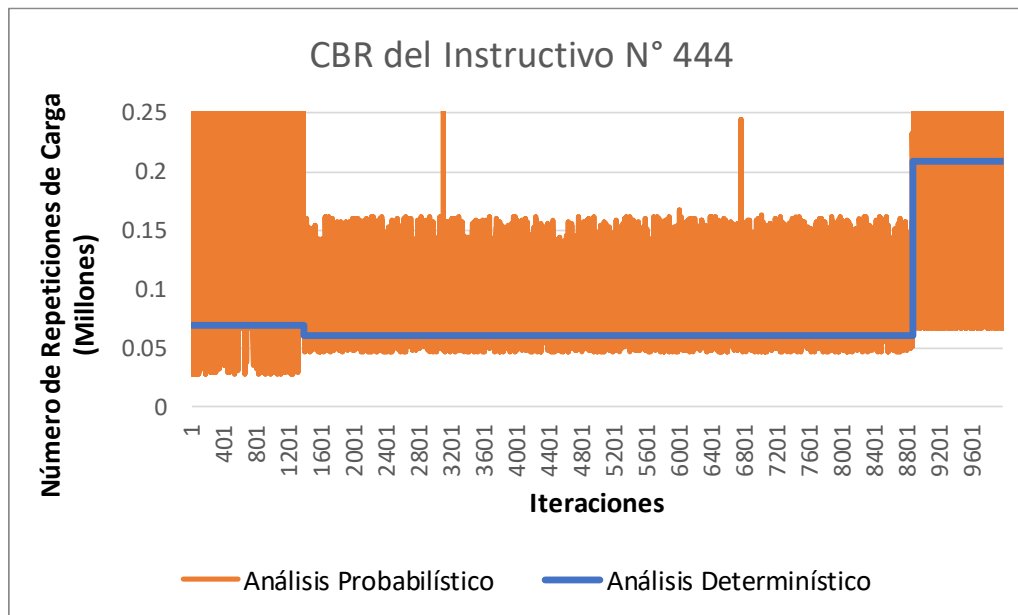


Figura 49.- Gráfica de Sensibilidad para las Funciones Deducidas de la UNAM Empelando los CBR's del Instructivo N°444 de la UNAM.

Como se mencionó anteriormente los diseños determinísticos tienen un valor constante, representado por la línea azul en las figuras mencionadas. Los quiebres que se presentan en las figuras, corresponden con el efecto de cada tipo de eje. La primera zona pertenece a los ejes sencillos, la segunda a los ejes Tándem y la tercera a los ejes Tridem. Se puede ver que en los ejes sencillos se presenta una variabilidad que va de 0.03 a 20 millones de ejes equivalentes, mientras el determinístico queda por debajo del valor medio

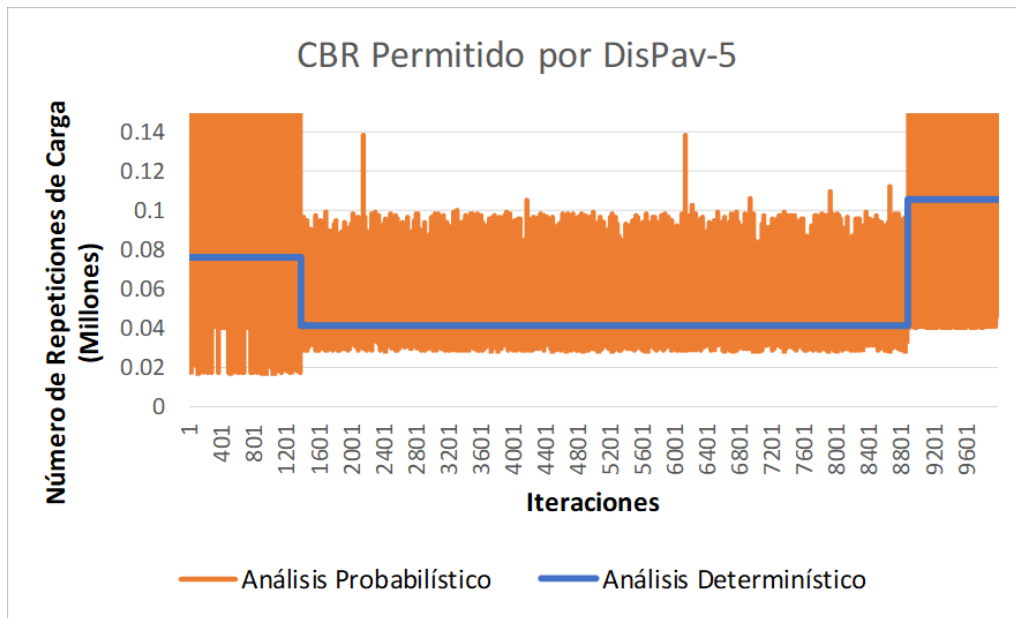


Figura 50.- Gráfica de Sensibilidad para las Funciones Deducidas de la UNAM Empelando los CBR's Permitidos por DISPAV-5.

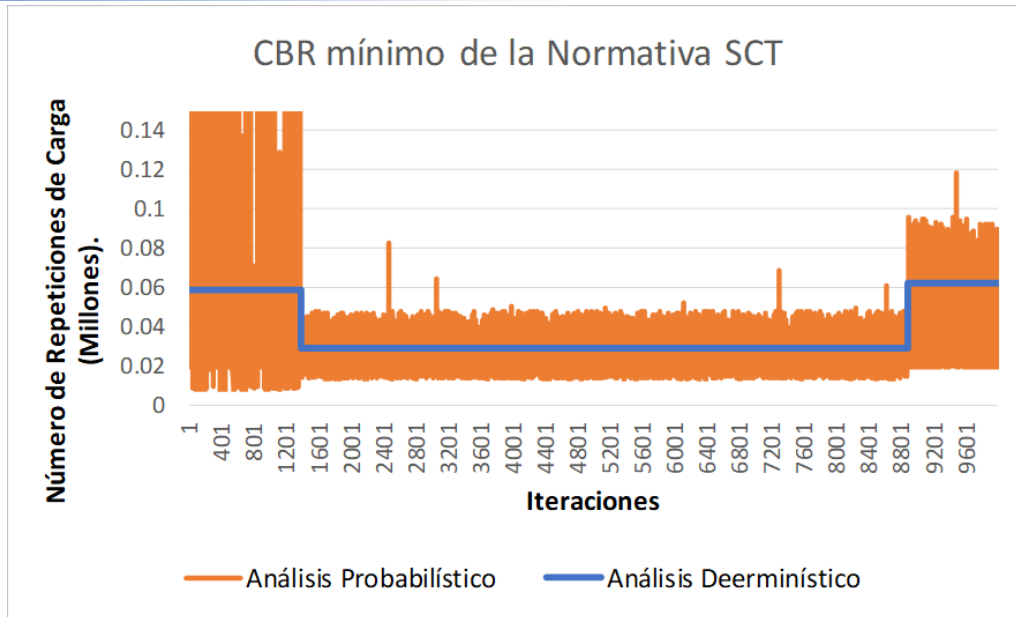


Figura 51.- Gráfica de Sensibilidad para las Funciones Deducidas de la UNAM Empleando los CBR's Permitidos por la Normativa SCT.

## Conclusiones

Esta tesis tiene como aportación principal la implementación de 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. 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 los resultados de las pruebas de laboratorio y de los aforos vehiculares.
- 2) Reduce la inversión tiempo-costo en el procesamiento de la información. Ya que se realiza un análisis de la variabilidad de las condiciones *in-situ* a través de técnicas probabilísticas que eliminan datos atípicos y 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 la información utilizada 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. Lo anterior debido a que analiza el comportamiento estructural de los pavimentos, mediante la obtención interna de la interacción que existe entre las variables de entrada mencionadas y que influyen directamente en el cálculo de los esfuerzos y deformaciones. Esto permite determinar la respuesta que tiene la estructura del pavimento ante las solicitaciones mencionadas con anterioridad; y a partir de la misma, determinar el daño ( $D_i$ ) en cada ciclo ( $i$ ) y para el modelo de simulación Monte Carlo, empleando la ley de Miner como modelo típico para acumulación de daños.

Los proyectistas al realizar los cálculos buscando una estructura acorde con las condiciones *in-situ* requieren visualizar y analizar el comportamiento estructural y el daño que se produce en los pavimentos al variar sus condiciones. La propuesta de este trabajo es la simulación Monte Carlo de las variables con distribuciones de probabilidad que representan la realidad. Esta metodología elevará la confiabilidad de los diseños de pavimentos flexibles, cuando el proyectista entienda el efecto de cada variable en el diseño. Con base en lo anterior, este trabajo de investigación aporta como herramienta computacional una interfaz de usuario para la aplicación del modelo del sistema descrito en esta investigación. La interfaz desarrollada permite realizar las siguientes acciones:

- 1) Analizar el comportamiento estructural mediante la generación de  $i$ -iteraciones de las diferentes propiedades y condiciones para un tramo de estructura de pavimento flexible con base en el método de simulación Monte Carlo. Esto permite evaluar de manera reiterada la

respuesta estructural que tiene la estructura del pavimento ante la aplicación de las diferentes solicitaciones, mediante el cálculo de esfuerzos y deformaciones derivados de la aplicación de las condiciones de entrada. Además de la determinación del daño que se ocasiona en ella, escalando este a un valor crítico de 1.

- 2) La determinación del 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 vehículos que transitan sobre la estructura del pavimento.

## Recomendaciones

Como recomendación fundamental para analizar de manera correcta la variabilidad de los parámetros de entrada. Para ello, se debe de contar con una buena muestra representativa de los factores que influyen de manera directa en el diseño de pavimentos flexibles.

Otra recomendación importante es caracterizar el tránsito en términos de espectros de carga ya que los valores máximos presentados en ellos permiten identificar los niveles de carga más usuales. Esto es un indicativo de la severidad que se puede esperar de los distintos deterioros en un tramo carretero a lo largo del tiempo.

## Trabajo Futuro

Durante el desarrollo de esta tesis se ha propuesto como hipótesis de trabajo que existe un correcto entrelazamiento de los insumos procesados. Sin embargo, en la práctica cualquier error o variación en los parámetros de entrada afectará el correcto funcionamiento de la aplicación desarrollada en este trabajo. Por lo tanto, la principal línea de continuación de este trabajo de investigación es, realizar un análisis de sensibilidad para determinar cómo varían los resultados de cada diseño ante cambios en las variables de entrada, manteniendo el valor de las demás constante.

La segunda línea de continuación de este trabajo de investigación es el desarrollo e implementación de un modelo de infiltración de agua, que permita analizar el grado de saturación producto de la precipitación de la zona. Debido a que en este trabajo sólo se considera la categoría 1 que corresponde a subrasantes con nivel freático suficientemente cercano a la superficie del terreno para así controlar su contenido de agua. Por lo que, se debe considerar la inclusión de un modelo para evaluar la categoría 2 enfocado al análisis de Subrasantes con nivel freático profundo y donde la lluvia es suficiente para producir cambios estacionales significativos bajo el camino.

Otra línea de investigación que se propone es la implementación de una pista de pruebas para analizar a escala natural el comportamiento estructural que tienen los pavimentos flexibles, ante las solicitaciones de cargas del tránsito, variación en las propiedades de los materiales y el efecto que las condiciones climáticas (temperatura y contenido de agua) tienen sobre las propiedades de los materiales. A partir de la pista de pruebas, será posible realizar un análisis comparativo entre la vida útil determinada mediante el modelo de simulación desarrollado en esta tesis y un caso de estudio con condiciones controladas.



## Bibliografía

- ASTM T307-99. (s.f.). Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials.
- AASHTO. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, D.C.
- AASHTO. (2004). *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*.
- AMAAC. (2013). *Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013*.
- 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.
- Chávez, C., Pastor, N., Alarcon, J., & Arreygue, E. (2013). Comparativa de la Teoría Multicapa de Elasticidad con el Método Simplificado de Odemark.
- Coria, C., Chávez, C., Alarcón, J., & Arreygue, E. (2012). Elaboración de un Programa de Diseño de Pavimentos Flexibles.
- Corro, S., Magallanes, R., & Prado, G. (1981). *Instructivo para Diseño Estructural de Pavimentos Flexibles para Carreteras*. México, DF.: Series del Instituto de Ingeniería.
- Dawson, A. (2008). Rut Accumulation and Power Law Models for Low-Volume Pavements Under Mixed Traffic.
- Elizondo, F., Badilla, G., & Ulloa, Á. (2007). Predicción de Módulos Resilientes en Mezclas Asfálticas Mediante el Modelo de Witczak. *Infraestructura Vial*.
- Espinosa, J. d., & Alarcón, J. (2012). Pavimentos Rígidos vs Flexibles: ¿Cuál es mejor?
- Garnica, P. (2009). Espectros de Carga y Daño para Diseño de Pavimentos.
- Huang, Y. (2004). *Pavement Analysis and Design*. UNIVERSITY OF KENTUCKY: PEARSON.
- Hwang, W., & Han, K. (1985). Cumulative Damage Models and Multi-Stress Fatigue Life Prediction.
- Ingeniería, D. E. (s.f.). *Real Academia de Ingeniería*.
- Leiva Padilla, P., Allen Monge, J., Badilla Vargas, G., & Loría Salazar, L. (2013). Análisis de Sencibilidad Sobre la Modelación de Carga en Costa Rica.
- Martins, J. F., Ferreira, M. R., Pardal, J. M., & Morano, C. R. (2012). Comparación de la Estimación de la Productividad del Proceso de Soldadura Eléctrica por los Métodos de Simulación Monte Carlo e Hiperccubo Latino.

- M-CAL-1-02/. (2001). Criterios Estadísticos de Muestreo.
- Ministro de Obras Públicas y Urbanismo. (2003). NORMA 6.1 IC SECCIONES DE FIRME, DE LA INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS.
- Minitab<sup>®</sup>. (2018). *Introducción a Minitab 18*.
- NOM-012-SCT-2-017. (2017). *NORMA Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017, Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal*.
- Núñez Mc Leod, J., & Barón, J. (1999). Técnicas Estadísticas Avanzadas en el Análisis de Grandes Modelos Computacionales. *Congreso Latinoamericano de Métodos Computacionales para Ingeniería, 2-3*.
- Pande, A., & Wholshon, B. (2016). *Traffic Engineering HandBook*.
- Pimienta Lastra, R. (2000). "Encuestas probabilísticas vs. no probabilísticas". *Política y Cultura*.
- Reza, M., & García, E. (1996). *Pruebas de Bondad de Ajuste*. México, DF.: MacGraw-Hill.
- Rico, A., Téllez, R., & Garnica, P. (1998). *Pavimentos Flexibles. Problemática, Metodologías de Diseño y Tendencias*. Sanfandila, Querétaro: Publicación Técnica No. 104.
- Rodríguez, M., Thenoux, G., & Gonzáles, A. (2016). Probabilistic Assessment of Asphalt Pavement Design. *Revista Ingeniería de Construcción*. Recuperado el 10 de Diciembre de 2016
- Rondón , H., & Reyes, F. (2007). Metodología de Diseño de Pavimentos Flexibles: Tendencias, Alcances y Limitaciones.
- Rosenblueth, E. (1975). Point Estimates for a Probability Moments.
- Rubio , S. (2018). *Metodología para la Construcción de Mapas de Temperatura Basada en la Influencia Termo-Topográfica y el Grado de Desempeño Aplicada en la Selección de Cementos Asfálticos*. Morelia.
- SCOI. (2007). *Catálogo de Firmes y Pavimentos de la Ciudad de Valencia*.
- SCT. (2013). *Catálogo de Secciones Estructurales de Pavimentos para las Carreteras de la República Mexicana*. México, DF.
- Sun, L., & Ronald Hudson, W. (2005). Probabilistic Approaches for Pavement Fatigue Cracking Prediction based on Cumulative Damage Using Miner's Law.
- Sun, L., Ronald Hudson, W., P. E., F. ASCE, & Zhang, Z. (2003). Empirical-Mechanistic Method Based Stochastic Modeling of Fatigue Damage to Predict Flexible Pavement Cracking for Transportation Infrastructure Management.

T-342-11, A. (2015). Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures.

Transport Research Laboratory. (1993). *A Guide to the Structural Design of Bitumen-Surfaced Roads in Tropical and Sub-Tropical Countries*. Crowthorne, Berkshire, United Kingdom.

Turochy, R. D., Timm, D. H., & Tisdale, S. M. (2005). *TRUCK EQUIVALENCY FACTORS, LOAD SPECTRA MODELING AND EFFECTS ON PAVEMENT DESIGN*. Montgomery, Alabama.

Urbaéz, E., & Erskine, J. (2011). *Project Level Australian Methodology for Flexible Pavement Design*. Sydney.

Vitoriano, B. (2012). *Modelos y Métodos de Simulación Estocástica. Aplicación en la Valoración de Opciones Financieras*. Madrid, España: Editorial Universidad Complutense de Madrid.

Wholson, Wholson, B., & Pande, A. (2016). *Traffic Engineering HandBook*.

## Anexo A

Tabla 28.- Grado PG para cada Estación Climatológica de Michoacán (Rubio Torres., 2018).

No.	CÓDIGO	NOMBRE	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD	PG-max	PG-min
1	16001	ACUITZIO DEL CANJE	-101.345	19.499	2200	64	-16
2	16003	AGUILILLA	-102.750	18.733	933	64	-16
3	16006	ANTUNEZ	-102.200	19.013	360	70	-16
4	16007	APATZINGAN (SMN)	-102.351	19.089	320	70	-16
5	16008	AQUILA	-103.504	18.599	180	70	-16
6	16009	ARTEAGA	-102.283	18.350	860	64	-16
7	16012	CAJONES	-101.912	19.210	480	76	-16
8	16014	CAMECUARO	-102.213	19.917	1708	64	-16
9	16016	CARRILLO PUERTO	-101.038	19.897	1840	64	-16
10	16017	CASA BLANCA	-101.459	20.319	1694	70	-16
11	16020	CIUDAD HIDALGO (DGE)	-100.554	19.692	2060	64	-16
12	16022	COINTZIO	-101.281	19.625	2096	70	-16
13	16024	CORRALES	-101.862	20.207	1730	64	-16
14	16026	CUATRO CAMINOS	-102.103	18.988	672	70	-16
15	16027	CUITZEO	-101.138	19.956	1831	70	-16
16	16028	CUITZILLO GRANDE	-101.119	19.767	1987	64	-16
17	16030	CUIMATO	-102.589	20.258	1520	64	-16
18	16031	CHAPARACO	-102.265	19.974	1589	64	-16
19	16033	EPITACIO HUERTA	-100.228	19.773		64	-16
20	16035	CHURUMUCO (CFE)	-101.643	18.660	205	70	-16
21	16036	EL BOSQUE (CFE)	-100.383	19.383	1909	64	-16
22	16039	PIEDRAS BLANCAS	-102.769	19.247	419	70	-16
23	16040	EL GIGANTE	-100.453	19.969	1961	64	-16
24	16043	EL PUERTO	-102.670	19.801	1640	64	-16
25	16045	EL TEMAZCAL	-100.955	19.651	2020	64	-16
26	16046	EL VASO INFIERNILLO (CFE)	-101.918	18.520	194	70	-16
27	16047	EL ZAPOTE	-101.718	18.914	520	70	-16
28	16050	HUANIQUEO	-101.505	19.899	2040	64	-16
29	16051	HUETAMO	-100.897	18.627	300	70	-16
30	16052	HUINGO	-100.862	19.921	1921	64	-16
31	16055	JESUS DEL MONTE	-101.151	19.652	2180	64	-16
32	16058	JUNGAPEO	-100.494	19.458	1248	70	-16
33	16061	LAGUNA DEL FRESNO	-100.416	19.816	2080	64	-16
34	16063	LA PALMA	-102.768	20.145	1520	64	-16
35	16065	LA PIEDAD DE CABADAS (DGE)	-102.021	20.337	1684	64	-16
36	16068	LAS FUENTES	-102.837	20.052	2200	64	-16
37	16073	LOS LIMONES (CFE)	-102.528	19.602	1175	64	-16
38	16080	MORELIA (OBS)	-101.183	19.700	1913	64	-16
39	16081	MORELIA	-101.176	19.689	1908	64	-16
40	16084	PANINDICUARO	-101.759	19.975	1852	64	-16
41	16085	PARACUARO	-102.225	19.150	597	70	-16
42	16086	PASTOR ORTIZ	-101.597	20.306	1692	64	-16
43	16087	PATZCUARO	-101.610	19.516	2140	64	-16
44	16088	PERIBAN	-102.415	19.521		64	-16
45	16091	ALVARO OBREGON (DGE)	-101.038	19.823	1840	64	-16

46	16093	PRESA GONZALO	-102.439	20.301	1530	70	-16
47	16094	PRESA GUARACHA	-102.584	19.961	1580	64	-16
48	16095	PRESA JARIPO	-102.600	19.958	1587	64	-16
49	16096	PRESA MALPAIS	-100.879	19.826	1859	64	-16
50	16097	PRESA PUCUATO	-100.686	19.622	2490	64	-16
51	16098	PRESA SABANETA	-100.669	19.611	2510	64	-16
52	16102	PUNTA SAN TELMO	-103.517	18.483		64	-16
53	16105	QUIRIO	-100.995	19.798	1858	64	-16
54	16106	SAN ANGEL	-102.549	19.860	1840	64	-16
55	16109	SAN DIEGO CURUPATZEO	-101.183	19.333	1444	70	-16
56	16111	SAN JOSE	-100.319	19.908	2043	64	-16
57	16112	SAN JUAN DE ALIMA	-103.675	18.583	530	70	-16
58	16113	SAN LUCAS	-100.783	18.567	318	70	-16
59	16114	SAN MIGUEL DEL MONTE	-101.134	19.620	1965	64	-16
60	16117	SANTA FE DEL RIO	-101.827	20.202	1681	64	-16
61	16118	SANTA FE	-101.556	19.673	2203	64	-16
62	16119	SANTA RITA	-101.261	19.904	1880	64	-16
63	16120	SANTIAGO UNDAMEO	-101.320	19.603	2130	64	-16
64	16122	SUSUPUATO DE GUERRERO	-100.407	19.215	1260	64	-16
65	16123	TACAMBARO	-101.457	19.236	1640	70	-16
66	16124	TEMASCALES	-100.149	20.051	2409	64	-16
67	16125	TANGANCICUARO	-102.205	19.889	1710	64	-16
68	16133	TURICATO	-101.421	19.054	740	70	-16
69	16135	TUZANTLA (SMN)	-100.583	19.217	666	70	-16
70	16136	TZITZIO	-100.924	19.583	1565	64	-16
71	16137	UREPETIRO	-102.127	19.975	1753	64	-16
72	16141	YURECUARO	-102.283	20.338	1543	64	-16
73	16145	ZINAPECUARO	-100.827	19.859	1880	64	-16
74	16146	ZIRAHUEN	-101.732	19.454	2090	64	-16
75	16154	COALCOMAN (SMN)	-103.150	18.767	1086	70	-16
76	16158	EL CAJON	-102.750	18.971	296	70	-16
77	16159	EL ROSARIO	-101.749	20.129	1700	64	-16
78	16162	ORANDINO	-102.325	19.967	1580	64	-16
79	16174	SAHUAYO	-102.724	20.057	1540	64	-16
80	16178	E.N.G.F. URUAPAN	-102.033	19.383	2193	64	-16
81	16187	E.T.A. 139 CARACUARO	-101.117	19.000	604	76	-16
82	16188	TIRINDARO	-101.742	19.767	2002	64	-16
83	16190	ARCEO	-102.269	18.720	320	70	-16
84	16192	LA ENCARNACION	-100.394	19.413	1720	64	-16
85	16194	E.T.A. 039 TOCUMBO	-102.520	19.702	1600	64	-16
86	16199	SAN MIGUEL CURINHUATO	-100.589	19.989	2020	64	-16
87	16208	CACHAN	-103.233	18.278	79	64	-16
88	16217	EL CANTIL	-102.417	18.017		64	-16
89	16219	SAN PEDRO	-100.828	19.072	530	70	-16
90	16220	SAN SIMON	-102.374	20.118	1550	64	-16
91	16224	TANHUATO (DGE)	-102.332	20.282	1542	70	-16
92	16225	VILLA JIMENEZ II	-101.747	19.923	2000	64	-16
93	16227	LAZARO CARDENAS	-102.196	19.148	70	70	-16
94	16228	ACAHUATO	-102.333	19.065	227	70	-16
95	16230	LAS CRUCES	-101.428	19.065	800	70	-16

96	16231	LAS CRUCES BARRERAS	-101.383	19.384	2408	64	-16
97	16232	EL DEVANADOR	-100.825	19.384	1060	70	-16
98	16233	EPITACIO HUERTA	-100.297	20.149	2503	64	-16
99	16234	GALEANA	-101.575	20.039	1935	64	-16
100	16235	HUAJUMBARO	-100.742	19.679	2285	64	-16
101	16237	EL LIMON	-100.565	18.931	460	70	-16
102	16238	MELCHOR OCAMPO	-100.659	19.096	496	70	-16
103	16239	MEXCALHUACAN	-102.656	18.079	30	70	-16
104	16240	EL PUEBLITO	-101.929	19.822	2371	64	-16
105	16241	TAFETAN	-100.907	19.424	913	70	-16
106	16243	ZIQUITARO	-101.889	20.061	1831	64	-16
107	16244	TIQUICHEO	-100.736	18.903	383	70	-16
108	16247	CAPULA	-101.392	19.675	2097	64	-16
109	16248	CAURIO DE GUADALUPE	-101.858	19.920	2064	70	-16
110	16250	HUANDACAREO	-101.275	19.989	1851	64	-16
111	16251	PATAMBAN	-102.289	19.803	2140	64	-16
112	16253	TANACO	-102.079	19.738	2140	64	-16
113	16254	TEREMENDO	-101.478	19.783	2188	64	-16
114	16255	UCAREO	-100.692	19.900	2554	64	-16
115	16258	PRESA TUXPAN	-100.482	19.540	1747	64	-16
116	16264	PRESA LOS OLIVOS	-102.837	19.201		70	-16
117	16512	EL COLEGIO	-101.178	19.773	1880	64	-16
118	16514	JARIPEO	-100.483	19.651	1880	64	-16
119	16515	LA SANDIA	-101.675	19.263	2180	64	-16