



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

División de Estudios de Doctorado en Ingeniería Civil

“DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA
PARA LA INCORPORACIÓN DEL CAMBIO
CLIMÁTICO EN EL DISEÑO PAVIMENTOS”

TESIS

Para obtener el grado de:
Doctor en Ingeniería Civil

Presenta:

M en C Juan Fernando Mendoza Sánchez

Asesor:

Dra. Elia Mercedes Alonso Guzman

Co-Asesor:

Dr. Rafael Soto Espitia



Morelia, Michoacán, Octubre de 2024

Resumen

En la presente investigación se presenta el desarrollo de una metodología y una herramienta para incorporar el clima y el cambio climático en el diseño de la subrasante en pavimentos carreteros, la cual se basa en el Sistema de Información Climática para el Diseño de Carreteras (SICliC) y el Modelo Climático Integrado Mejorado (EICM) del MEPDG de AASHTO, mediante el cual se puede estimar el Índice de Humedad Thornthwaite (TMI) con base en datos históricos de precipitación y temperatura, y también utilizando escenarios del cambio climático para México.

La propuesta permite determinar el comportamiento de variables que influyen el módulo de resiliencia y que están asociadas al clima, tales como el contenido de humedad, la matriz de succión y el grado de saturación, mediante los cuales se puede estimar un factor ambiental para materiales granulares que conforman el suelo de cimentación o subrasante. Este factor permite ajustar el módulo de resiliencia óptimo en un módulo de resiliencia en equilibrio para el sitio de proyecto.

Los resultados de este estudio muestran que la variación climática influye el comportamiento del módulo de resiliencia, debido a cambios en las condiciones de equilibrio iniciales, la fluctuación estacional de la precipitación y la temperatura, y de los cambios proyectados del cambio climático. El ejemplo práctico permitió constatar que las estimaciones realizadas permiten considerar adecuadamente el clima y el cambio climático en el módulo de resiliencia de la subrasante para pavimentos carreteros.

La consideración del clima y el cambio climático del sitio del proyecto en el diseño de pavimentos, particularmente el módulo de resiliencia de la subrasante permitirá aumentar la durabilidad y la resiliencia de los pavimentos.

Palabras clave: módulo de resiliencia, diseño de pavimentos, cambio climático, carreteras, subrasante.

Abstract

This study presents the development of a methodology and a tool to incorporate climate and climate change in the design of road pavement subgrade, which is based on the Climate Information System for Highway Design (SICliC) and the Enhanced Integrated Climate Model (EICM) of AASHTO's MEPDG, through which the Thornthwaite Moisture Index (TMI) can be estimated based on historical precipitation and temperature data, and also using climate change scenarios for Mexico.

The proposal allows determining the behavior of variables that influence the soil resilient modulus and that are associated with climate, such as moisture content, suction matric and degree of saturation, through which an environmental factor can be estimated for granular materials that constitute the foundation soil or subgrade. This factor allows the resilient modulus at optimum to be adjusted to a resilient modulus at equilibrium for the project site.

The results of this study show that climate variation influences the behavior of the soil resilient modulus, due to changes in the initial equilibrium conditions, seasonal fluctuation of precipitation and temperature, and projected changes of climate change. The practical example demonstrated that the results of the estimations carried out allow climate and climate change to be adequately considered in the subgrade resilient modulus of road pavements.

Addressing the climate and climate change of the project site in pavement design, particularly the resilient modulus of the subgrade, will increase the durability and resilience of pavements.

Key words: resilient modulus, pavement design, climate change, roads, subgrade.

Índice de Contenido

	Página
Introducción.....	1
1. Revisión crítica a los métodos de diseño de pavimentos	7
1.1 Los primeros métodos de diseño de pavimentos	9
1.2 Nuevos enfoques para el diseño de pavimentos	10
1.3 Consideraciones del clima en los métodos de diseño de pavimentos	12
1.4 Variables de los métodos de diseño ligados al clima	20
1.5 Principales hallazgos de la revisión de los métodos de diseño.....	21
2. Propuesta metodológica para incorporar el cambio climático en el diseño de pavimentos	23
2.1 Impacto climático en los pavimentos.....	24
2.1.1 Influencia del clima en los pavimentos.....	24
2.1.2 Impacto del cambio climático en los pavimentos	25
2.2 Una aproximación para considerar el cambio climático en el diseño de pavimentos	26
2.2.1 Descripción de la metodología.....	26
2.2.2 Escenarios climáticos	27
2.2.3 Índice de Humedad Thornthwaite	28
2.2.4 Factor ambiental	29
2.3 Aplicación de la metodología propuesta	30
2.3.1 Ubicación del sitio	30
2.3.2 Sistema de Información Climática para el Diseño de Carreteras (SICliC) 30	
2.3.3 Datos climáticos de las estaciones meteorológicas	32
2.3.4 Determinación del Índice de Humedad Thornthwaite	33

2.3.5	Determinación del Índice de Humedad Thornthwaite considerando el cambio climático.....	34
2.3.6	Determinación del Factor Ambiental	36
2.4	Uso potencial de la información para el diseño de pavimentos	38
3.	Desarrollo de una herramienta para considerar el clima y el cambio climático en el módulo de resiliencia de la subrasante en pavimentos carreteros	39
3.1	El módulo de resiliencia en el diseño de pavimentos.....	40
3.1.1	Factores que influyen en el comportamiento del módulo de resiliencia 40	
3.1.2	Protocolos de prueba para determinar el módulo de resiliencia	41
3.1.3	Modelos para determinar el módulo de resiliencia.....	41
3.1.4	Utilización del módulo de resiliencia en el diseño de pavimentos....	42
3.2	Incorporación del clima en el módulo de resiliencia para el diseño de pavimentos	42
3.2.1	Incorporación del clima en el MEPDG-AASHTO	43
3.2.2	El Índice de Humedad Thornthwaite en el diseño de pavimentos....	43
3.3	Descripción de la herramienta para la determinación del módulo de resiliencia considerando el clima y el cambio climático en el sitio de proyecto..	44
3.3.1	Grado de Saturación Óptima	44
3.3.2	Contenido de Humedad Óptimo.....	45
3.3.3	Índice de plasticidad ponderado	45
3.3.4	Índice de Humedad Thornthwaite	45
3.3.5	Gravedad específica del suelo.....	45
3.3.6	Matriz de succión	45
3.3.7	Contenido volumétrico saturado de agua	46
3.3.8	Contenido volumétrico de agua	47
3.3.9	Grado de saturación	47
3.3.10	Factor ambiental	47
3.3.11	Módulo de Resiliencia Óptimo	48
3.3.12	Módulo de Resiliencia en Equilibrio	49
3.4	Caso de estudio	50
3.4.1	Cálculo de las propiedades del suelo	50
3.4.2	Determinación del Índice de Humedad Thornthwaite	50

3.4.3	Determinación del Índice de Humedad Thornthwaite considerando el cambio climático.....	51
3.4.4	Estimación de las propiedades del suelo con base en la variación climática52	
3.4.5	Factor ambiental	54
3.4.6	Módulo de Resiliencia Óptimo	54
3.4.7	Módulo de Resiliencia en Equilibrio	55
3.4.8	Uso de la información	56
4.	Descripción de la funcionalidad de la herramienta a través del SICiC	59
	Conclusiones.....	62
	Bibliografía	65
	Anexo 1 Factor de ajuste PET.....	79

Índice de Figuras

Figura 1.1 Principales factores que interactúan en el desempeño de un pavimento	7
Figura 1.2 Diagrama de diseño de pavimentos flexibles en el sistema interestatal	13
Figura 1.3 Nomograma para estimar el módulo de resiliencia efectivo del suelo de cimentación para pavimentos flexibles utilizando el criterio de serviciabilidad	14
Figura 1.4 Porcentaje de valores de CBR iguales o mayores para cada valor	15
Figura 1.5 CBR de diseño para la subrasante.....	15
Figura 1.6 Espesor del concreto asfáltico para clima frío	16
Figura 1.7 Curva de ponderación de la temperatura	17
Figura 1.8 Tabla de trabajo para la determinación de la temperatura media anual del aire ponderada (w-MAAT)	17
Figura 1.9. Ejemplo de gráfico para la determinación de espesores de la carpeta asfáltica del método Shell	18
Figura 1.10. Diagrama de flujo del EICM	19
Figura 1.11 Ilustración gráfica para 5 quintiles usados en el MEPDG para determinar las propiedades de las mezclas HMA	20
Figura 2.1 Pérdida de serviciabilidad debido a dos principales factores (tránsito y clima).....	24
Figura 2.2 Diagrama de flujo para incorporar el cambio climático en el módulo de resiliencia	27
Figure 2.3 Arquitectura del SICliC [15].....	31
Figure 2.4 Visualizador Web del SICliC	32
Figura 2.5 Selección de la estación del SICliC.....	33
Figura 2.6 Selección de escenarios del cambio climático para el sitio de proyectos mediante el SICliC – Ejemplo SSP 4.5.....	34
Figura 2.7 Variación del TMI en función de los diferentes escenarios SSP – Caso de estudio “Región Noroeste”	36

Figura 2.8 Variación del factor ambiental en función de los diferentes escenarios SSP – Caso de estudio “Región Noroeste”	37
Figure 3.1 Diagrama de flujo de la propuesta metodológica para estimar el módulo de resiliencia considerando el clima y el cambio climático	44
Figura 3.3. Modelo <i>TMI – P200/wPI</i> para materiales de subrasante.....	53
Figura 3.4 Gráfico para el diseño estructural de pavimentos flexibles – Método AASHTO.....	57
Figura 4.1 Selección de la estación climatológica y del aplicativo para estimar el Módulo de resiliencia.....	59
Figura 4.2 Selección de la estación climatológica y del aplicativo para estimar el Módulo de resiliencia.....	59
Figura 4.3 Uso del aplicativo para estimar el Módulo de resiliencia.	60
Figura A.1 Coordenadas geográficas de México.....	80

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Coeficiente del tránsito	13
Tabla 1.2 Coeficientes de saturación	13
Tabla 1.3 Valores recomendados de “m” para modificar los coeficientes de capa en materiales granulares de base y subbase	15
Tabla 1.1 Variables climáticas para el diseño de pavimentos	22
Tabla 2.1 Información de los sitios de los casos de estudio.....	30
Tabla 2.2 Temperatura media mensual de los casos de estudio	33
Tabla 2.3 Precipitación mensual de los casos de estudio	33
Tabla 2.4 Índice de humedad de Thornthwaite mensual	34
Tabla 2.5 Índice de humedad de Thornthwaite mensual, SSP-4.5.....	35
Tabla 2.6 Índice de humedad de Thornthwaite mensual, SSP-7.0.....	35
Tabla 2.7 Índice de humedad de Thornthwaite mensual, SSP-8.5.....	35
Tabla 2.8 Factor ambiental – Datos históricos	36
Tabla 2.9 Factor ambiental – Escenario del cambio climático SSP-4.5	36
Tabla 2.10 Factor ambiental – Escenario del cambio climático SSP-7.0	37
Tabla 2.11 Factor ambiental – Escenario del cambio climático SSP-8.5	37
Tabla 3.1 Valores recomendados para el módulo de resiliencia en condición óptima MR – opt (psi)	49
Tabla 3.2 Granulometría e Índice de Plasticidad del suelo del sitio de proyecto...	50
Tabla 3.3 Resultados del cálculo de las propiedades del suelo	50
Tabla 3.4 Datos meteorológicos promedios históricos del sitio de proyecto	51
Tabla 3.5 Índice de humedad de Thornthwaite mensual	51
Tabla 3.6. Proyección del Índice de humedad de Thornthwaite mensual considerando el cambio climático.....	52

Tabla 3.7 Resultados de la matriz de succión del suelo con base en la variación climática mensual – Datos históricos	52
Tabla 3.8 Resultados de la matriz de succión del suelo con base en la variación climática mensual – Datos proyectados del cambio climático	52
Tabla 3.9 Resultados del contenido volumétrico del agua con base en la variación climática mensual – Datos históricos	53
Tabla 3.10 Resultados del contenido volumétrico del agua con base en la variación climática mensual – Datos proyectados del cambio climático	53
Tabla 3.11 Resultados del grado de saturación con base en la variación climática mensual – Datos históricos	53
Tabla 3.12 Resultados del grado de saturación con base en la variación climática mensual – Datos proyectados del cambio climático.....	54
Tabla 3.13. Resultados del factor ambiental con base en la variación climática mensual – Datos históricos	54
Tabla 3.14 Resultados del factor ambiental con base en la variación climática mensual – Datos históricos	54
Tabla 3.15 Módulo de resiliencia – Caso de estudio	55
Tabla 3.16 Módulo de resiliencia en equilibrio – Datos históricos	55
Tabla 3.17 Módulo de resiliencia en equilibrio – Datos proyectados del cambio climático	55
Tabla A.1 Posible Duración Promedio de Luz Solar - Hemisferio Norte.....	79
Tabla A.2 Posible Duración Promedio de Luz Solar - Hemisferio Norte.....	80

Introducción

La importancia de los pavimentos, más allá de los beneficios funcionales y prácticos para los usuarios de las carreteras, es que es un activo fundamental de los sistemas de transporte, pero también es un componente básico del funcionamiento del sistema societal (Plati, 2019). De esta manera los pavimentos son considerados como el activo más importante que integran la infraestructura carretera.

Las estructuras de pavimento suelen estar expuestas a cargas mecánicas y ambientales complejas y de gran magnitud (Mulugeta *et al*, 2023). Las principales fallas en los pavimentos se deben principalmente al daño a la fatiga y la deformación permanente (Baladi, 1998; Sudarsanan & Kim, 2022; Uzan, 2004).

Para asegurar la durabilidad de los pavimentos, diversas instituciones han desarrollado varios métodos con enfoques empíricos y mecánico-empíricos para modelar el desempeño de un pavimento y su deterioro en función de diferentes variables (Mills *et al*, 2006). Sin embargo, solo algunos consideran adecuadamente el clima del sitio para donde se está diseñando el pavimento.

El clima sirve como un insumo esencial en el diseño del pavimento y, dependiendo de su variabilidad, puede tener un impacto significativo en el desempeño del pavimento (Li *et al*, 2011). Por eso es importante que los métodos de diseño de pavimentos consideren el clima, pero también consideren el cambio climático. De acuerdo con el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2023), el cambio climático está afectando a muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos en todas las regiones del planeta.

Esto nos hace plantear, que, si bien el clima ya tenía un efecto adverso sobre la vida útil de un pavimento, este se verá agravado por el cambio climático. El cambio climático tiene efectos significativos en el desempeño del pavimento y, por lo tanto, debe incorporarse al procedimiento de diseño del pavimento (Qiao *et al*, 2013).

En la presente investigación se plantea una propuesta práctica para incorporar el cambio climático en los métodos de diseño de pavimentos, particularmente en el módulo de resiliencia del suelo de subrasante o cimentación mediante el Índice de Humedad de Thornthwaite (TMI), el cual puede incorporar el clima del sitio del proyecto y su variabilidad futura en función de las proyecciones del cambio climático.

La propuesta se basa en el enfoque mecánico-empírico del MEPDG de AASHTO, el cual utiliza el Modelo Climático Integrado Mejorado (EICM), mediante el cual se estima un factor ambiental que incorpora los cambios de humedad del suelo e impacta en la capacidad estructural de la subrasante, representada por el módulo de resiliencia.

La propuesta también permite determinar predecir el comportamiento de variables que influyen el módulo de resiliencia y que están asociadas al clima, tales como el contenido de humedad, la matriz de succión y el grado de saturación, mediante los cuales se puede estimar un factor ambiental para materiales granulares. Este factor permite ajustar el módulo de resiliencia óptimo en un módulo de resiliencia en equilibrio para el sitio de proyecto.

Para considerar el clima y el cambio climático en el módulo de resiliencia del suelo de la subrasante se desarrolló una herramienta práctica basada en el Sistema de Información Climática para el Diseño de Carreteras (SICliC).

La incorporación del clima y del cambio climático en los métodos de diseño de una manera practica permite aumentar la certidumbre de los resultados, asegurando estructuras de pavimentos más resilientes al clima, aumentando su durabilidad durante la vida de servicio.

Motivación

Los pavimentos representan una importante inversión en infraestructura que es relevante para el desarrollo, el crecimiento económico y el bienestar social en cualquier región del país o del mundo en general.

Las principales fallas en los pavimentos se deben principalmente al daño a la fatiga, las deformaciones y el deterioro, de la estructura y las capas que lo conforman. Los principales factores que influyen en su comportamiento es la carga asociada a los vehículos que transitan y el sobrepeso que se les atribuye a los vehículos de carga, la calidad de los materiales ya sea el asfalto o los agregados pétreos, los procedimientos de trabajo y el control de calidad en la construcción, y por último un inadecuado mantenimiento del pavimento durante la operación de la carretera.

De acuerdo con el estado del arte, las investigaciones destacan la importancia de considerar el clima de manera adecuada en los métodos de diseño de pavimentos, cuyos resultados muestran los efectos, que la temperatura, la precipitación, o las inundaciones, tienen sobre los pavimentos.

Las condiciones medioambientales tienen un efecto significativo en el desempeño de los pavimentos (Zapata *et al*, 2007). Qiao *et al* (2019), establece que el clima influye en la tasa de deterioro del pavimento, y por lo tanto en su mantenimiento y los costos en su ciclo de vida. Con base en lo anterior, Ankit *et al* (2011) sugiere que los factores ambientales y su variación son elementos fundamentales que deben considerarse en el diseño y mantenimiento de los pavimentos. Sin embargo, no siempre es considerado adecuadamente en los métodos que se utilizan para los métodos empíricos para los pavimentos flexibles.

Aunque el método mecanicista-empírico (MEPDG, por sus siglas en inglés de *Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide*) permite considerar de mejor manera el clima, a través del Modelo Climático Integrado Mejorado (EICM, por sus

siglas en inglés de “*Enhanced Integrated Climatic Model*”), sin embargo, el modelo tiene limitaciones espaciales y temporales. , Este método para el diseño de pavimentos utiliza el clima en función de datos históricos, y dado que los pavimentos se diseñan para periodos de diseño que superan los 20 años, es necesario considerar la variabilidad climática futura esperada por el cambio climático.

En México no se cuenta con ningún modelo que permita incorporar los factores climáticos en el diseño de los pavimentos para que estos puedan hacer frente a los daños, ya sean métodos empíricos o mecánico-empíricos.

El clima y el cambio climático debe ser incorporado a los métodos de diseño de pavimentos, y cada región/país debe considerar su propia metodología para hacerlo, ya que la información del clima y las proyecciones del cambio climático son diferentes para cada lugar.

La caracterización medioambiental del sitio en donde se diseñe un pavimento es muy importante para garantizar un desempeño adecuado del pavimento y evitar fallas durante su periodo de diseño. Por lo que resulta necesario construir una base climática nacional que sirva como insumo en el diseño de pavimentos, y asegurar que los métodos consideren el clima de manera más específica.

De esta manera la presente investigación busca proponer una metodología que permita adaptar el diseño de pavimentos al cambio climático, ya que, en las últimas décadas, las condiciones climáticas de México han variado considerablemente y esto se ha visto reflejado en diversos impactos en la infraestructura carretera. Las proyecciones del clima actual suponen que se tendrán impactos significativos en la evaluación, planificación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de la infraestructura carretera.

El trabajo desarrollado busca incorporar estos cambios en los valores de referencia del clima histórico, en valores de referencia adaptados al cambio climático que permitan aumentar la resiliencia de los pavimentos flexibles en México.

Objetivo general

Desarrollar una metodología que incorpore el clima y el cambio climático en el método de diseño mecánico-empírico de pavimentos flexibles de acuerdo los datos meteorológicos del sitio de proyecto y los escenarios climáticos para México, para mejorar su desempeño, su durabilidad y aumentar su resiliencia, así como disminuir los gastos de mantenimiento de las carreteras y reducir el consumo de recursos naturales.

Para alcanzar el objetivo anterior, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Realizar una revisión crítica de los métodos de diseño de pavimentos flexibles utilizados en México y otros países, con especial enfoque en la incorporación del clima.

- Desarrollar un procedimiento metodológico que permita incorporar la información climática local en el diseño mecánico-empírico de pavimentos flexibles en México.
- Construir una base de datos georreferenciada que integre información meteorológica y climática de estaciones meteorológicas en México a través de una plataforma tecnológica.
- Desarrollar los archivos con información meteorológica y climática del país que permitan alimentar la herramienta a desarrollar.
- Desarrollar una metodología para incorporar el cambio climático en los métodos de diseño mecánico-empírico de pavimentos flexibles, de acuerdo con los escenarios climáticos construidos para México.
- Implementar la metodología desarrollada para incorporar el clima y el cambio climático en la capa de subrasante de un pavimento.

Alcance

La metodología propuesta solo busca la incorporación del clima y el cambio climático para el diseño de pavimentos flexibles que son los más construidos en México.

La base de datos del clima se construirá a nivel nacional con la información meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para su uso en general.

Para los estudios de caso y análisis para la incorporación del cambio climático se realizará en sitios específicos con base a la información geoespacial de los escenarios climáticos desarrollados.

Debido a que la información climática tiene vigencia en la temporalidad se establecerá un año base como límite para los análisis. Sin embargo, se buscará diseñar mecanismos que permitan actualizar la información climática de manera automática en el modelo.

En relación con los modelos de proyección del cambio climático, se utilizarán únicamente los escenarios SSP 4.5, 7.0 y 8.5 existentes.

Organización de la tesis

El capítulo 1 muestra una revisión crítica de los métodos de diseño de pavimentos flexibles, desde los primeros basados en la experiencia, como los métodos empíricos hasta los más recientes sobre metodologías mecánico-empíricas, donde con base en diferentes principios determinan los espesores de las capas que integran la estructura de un pavimento para identificar como estos métodos han incluido las variables climáticas dentro de su procedimiento. Se identificó que la temperatura es incorporada en el módulo de dinámico de la mezcla asfáltica y que la precipitación/humedad es incorporadas mediante el módulo de resiliencia en las capas granulares (base, subbase y el suelo de cimentación o subrasante), sin embargo, estos no consideran el cambio climático.

En el capítulo 2 se desarrolló una aproximación para incorporar el clima mediante un diagrama de flujo que puede ser aplicado para cualquier sitio de proyecto en cualquier parte del mundo, donde con base en datos de estaciones meteorológicas y escenarios de cambio climático regionales, y el Modelo Climático Integrado Mejorado (EICM, por sus siglas en inglés de *Enhanced Integrated Climatic Model*) del *Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG), pero que puede ser aplicado en casi cualquier método de diseño de pavimentos ya sean empíricos o mecánico-empíricos. Para esto se propone estimar el Índice de Humedad Thornthwaite (TMI) con base en datos históricos de precipitación mensual y temperatura media mensual, en donde se plantea incorporar las variaciones climáticas proyectadas de acuerdo a diferentes escenarios basados en trayectorias socio-económicas compartidas (SSP).

La propuesta permite determinar predecir el comportamiento del TMI con datos históricos y proyecciones climáticas para México, y con ello estimar un factor ambiental para materiales granulares.

En el capítulo 3 se presenta el desarrollo de la herramienta para considerar el clima y el cambio climático en el módulo de resiliencia del suelo de la subrasante. Además del EICM, la herramienta práctica está basada en el Sistema de Información Climática para el Diseño de Carreteras (SICliC). La propuesta permite determinar predecir el comportamiento de variables que influyen el módulo de resiliencia y que están asociadas al clima, tales como el contenido de humedad, la matriz de succión y el grado de saturación, mediante los cuales se puede estimar un factor ambiental para materiales granulares. Este factor permite ajustar el módulo de resiliencia óptimo en un módulo de resiliencia en equilibrio para el sitio de proyecto.

El capítulo 4 muestra la funcionalidad de la herramienta construida, la cual permita considerar el clima del sitio de proyecto, el cambio climático esperado, y estimar el TMI para ambos casos (datos históricos y proyecciones climáticas futuras), calcular el factor ambiental y su impacto en el módulo de resiliencia, pasado de módulo en condiciones óptimas a condiciones en equilibrio, en función de su variación mensual de la temperatura y la humedad del sitio.

Finalmente se presentan las conclusiones del trabajo de investigación, y se sugieren las investigaciones futuras en función del trabajo desarrollado.

1. Revisión crítica a los métodos de diseño de pavimentos

El diseño de pavimentos puede ser definido como la determinación de los espesores del pavimento y de las capas que lo integran, las cuales son colocadas en el suelo natural preparado en un medioambiente en particular (condiciones naturales) para proveer una superficie satisfactoria para el tránsito en función de determinadas condiciones externas (Scala, 1962).

Para asegurar la durabilidad de los pavimentos, diversas instituciones han desarrollado varios métodos con enfoques empíricos y mecánico-empíricos para modelar el desempeño de un pavimento y su deterioro en función de diferentes variables (Mills *et al*, 2006). Para los pavimentos flexibles, los métodos se han basado en el comportamiento del suelo, en el uso de teorías, en análisis estadísticos de pruebas de campo, etc., que han permitido clasificarlos y estudiarlos (NRB, 1970; Haas *et al*, 1994; Huang, 2004).

Las principales variables que influyen en el diseño y desempeño de un pavimento se muestran en la Figura 1.1 En ella se pueden observar cómo estas variables interactúan entre sí, lo cual lo convierte en un problema complejo (Haas, 2001). Las variables que se consideran son: diseño de la estructura del pavimento, tránsito de diseño, construcción del pavimento y sus capas, mantenimiento del pavimento, y el medio ambiente. Estos factores en conjunto determinan la vida útil de un pavimento.

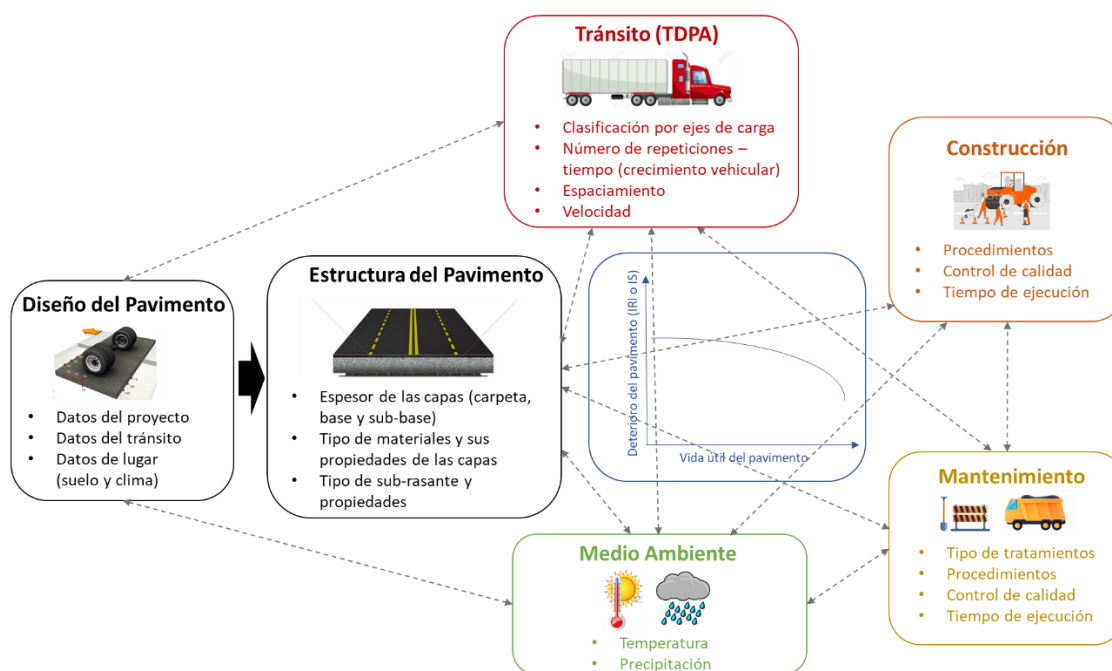


Figura 1.1 Principales factores que interactúan en el desempeño de un pavimento

Fuente: Elaboración propia, basada en Haas, 2001.

De acuerdo con Corro & Prado (1974), las principales variables que intervienen en el diseño de un pavimento flexible pueden clasificarse en tres categorías:

- a) Estructurales. Incluyen características relativas a cada una de las capas que constituyen el pavimento carretero, tales como espesores, resistencia y deformabilidad en las condiciones esperadas de servicio. Todo esto tiene que ver con los materiales que conforman la estructura y las demandas o solicitaciones de diseño.
- b) Carga. Se refiere a los efectos producidos por el tránsito mezclado al circular por la carretera. En este caso son importantes datos relacionados con el tránsito medio diario anual, tasa de crecimiento anual, cargas por eje sencillo o tándem, histograma de distribución del tránsito en la sección transversal del camino, y vida de proyecto del pavimento antes que la carretera requiera reconstrucción, en cuyo caso debe definirse de antemano el criterio de falla del pavimento. El tránsito mezclado se debe transformar en tránsito equivalente en ejes sencillos, mediante el empleo de factores teórico-empíricos.
- c) Clima y condiciones regionales. Las características reológicas de los materiales que constituyen la carretera dependen de la temperatura, el régimen de precipitación, precipitación media anual, nivel freático, geología y topografía de la región

Bajo la metodología empírica, el diseño del pavimento busca determinar el espesor de las capas en función del material a emplear, para soportar las cargas de vehículos que viajan con base a experiencias previas y observaciones de su comportamiento en estudios de campo (Schwartz & Carvalho, 2007). Los métodos empíricos describen variables sobre el clima que el procedimiento de diseño no siempre establece claramente como considerarlas, las cuales son actualmente de especial interés, ya que las variables meteorológicas influyen en las características físicas, mecánicas y químicas de los materiales. Por ejemplo, la temperatura (efecto sobre el estado sólido, termoelásticos, conservación y transferencia de calor, congelamiento y deshielo) (Ali & Lopez, 1996; Wistuba & Walther, 2013; Xueying *et al*, 2020, Ud Din *et al*, 2020) el régimen de precipitación (precipitación media y máxima anual, en la humedad relativa) (Lu *et al*, 2018; Wang *et al*, 2020), nivel freático (capilaridad en las subcapas del pavimento) (Dan *et al*, 2012), radiación solar (destrucción de los enlaces del asfalto por los rayos UV) (Yu *et al*, 2019; Li *et al*, 2022), etc.

Las condiciones medioambientales tienen un efecto significativo en el desempeño de los pavimentos (Zapata *et al*, 2007). El clima influye en la tasa de deterioro del pavimento, y por lo tanto en su mantenimiento y los costos en su ciclo de vida (Qiao *et al*, 2019). Por lo tanto, los factores ambientales y su variación son elementos fundamentales que deben considerarse en el diseño y mantenimiento de los pavimentos (Ankit *et al*, 2011).

Los factores ambientales que afectan los pavimentos se pueden clasificar en dos, externos e internos. Los factores externos que tienen especial influencia en el

comportamiento y durabilidad de un pavimento es la temperatura y la precipitación, el nivel freático y los ciclos de congelamiento-deshielo. Por su parte, los factores internos que impactan en el desempeño de los pavimentos es la humedad, el drenaje en las capas y la infiltración (Zapata *et al*, 2007).

Para evaluar cómo se ha considerado el clima se realizó una revisión histórica de los métodos de diseño y los nuevos enfoques, para después analizarlos detalladamente para identificar como algunos de ellos han considerado e incorporado el clima en el diseño estructural de un pavimento flexible para carreteras, y con base ello identificar la manera de incorporar el cambio climático en el diseño de pavimentos.

1.1 Los primeros métodos de diseño de pavimentos

El Departamento de Carreteras de California, desarrolló un método para determinar el espesor de un pavimento basados en el Ensayo de Relación de Soporte de California (CBR, por sus siglas en inglés de *California Bearing Ratio*) [Porter, 1950; Huang, 2004]. El método establece que la resistencia a la penetración del material de base puede tomarse como un valor de referencia para el diseño del pavimento y que estos pudieran soportar las cargas por eje, de una manera económica, las cuales se clasifican en tres grupos de acuerdo con las condiciones del tránsito: ligero, medio y alto.

En el Departamento de Carreteras del Estado de Missouri, utilizaron un método empírico para el diseño de pavimentos flexibles, considerando dos factores, el “Índice de grupo” y los “vehículos pesados” (Davis & Jones, 1954). El índice de grupo no se utiliza para colocar el suelo en un grupo en particular, en realidad, es un medio de calificar el valor del suelo como un material de sub-rasante dentro de su propio grupo.

El método de falla por cortante límite se utiliza para determinar el espesor de los pavimentos de modo que no ocurran fallas por cortante. Una primera aproximación fue realizada por Barber (1946), en la cual aplicó la teoría de Terzaghi (1943), para determinar espesores de los pavimentos. Para introducir dicha teoría, Barber aplicó los resultados de la prueba de compresión triaxial en muestras de suelos no alteradas. Por su parte McDowell (1954), construyó un diagrama con base en el procedimiento de prueba triaxial desarrollado en el Departamento de Carreteras de Texas, que consta de envolventes de Mohr que se han correlacionado con el servicio de la carretera. Una vez clasificado el suelo en función de sus esfuerzos, se puede determinar el espesor de la base del pavimento.

Estos primeros métodos consideraron las propiedades del suelo como una primera aproximación para caracterizar el comportamiento ambiental del sitio en donde se pretenda diseñar y construir un pavimento.

Un método de deflexión límite se utiliza para determinar el espesor de un pavimento procurando no exceder el límite permitido de deflexión vertical. Palmer & Barber (1940) desarrollaron expresiones teóricas basadas en el desplazamiento de

Boussinesq para una capa elástica y homogénea, la cual permitía determinar el espesor de un pavimento. La Comisión de Carreteras del Estado de Kansas (1947), modificó la ecuación de Boussinesq y limitó la deflexión. La ecuación de referencia incluyó un coeficiente de saturación en función de la precipitación promedio anual, el cual influye en la determinación del espesor requerido del pavimento.

Uno de los denominados método de elasticidad, es el método Shell determina el espesor del pavimento a través de gráficos, donde la estructura del pavimento es representada como un sistema multicapas elástico lineal, en el cual el material es caracterizado por el módulo de elasticidad de Young y el radio de Poisson. El tránsito es representado como una carga que actúa vertical y horizontalmente sobre la superficie (Shell International Petroleum Company, 1977 & 1978). El método incorpora el módulo dinámico de la subrasante como uno de los principales parámetros de diseño determinado mediante cargas representativas de vehículos y un contenido de humedad de equilibrio. Con base en estos módulos se puede determinar el espesor de la carpeta de acuerdo con el tipo de mezcla y la temperatura del sitio.

Los métodos que basados en análisis estadísticos permitieron construir ecuaciones de regresión y gráficos para el diseño de pavimentos, fundamentados en los resultados obtenidos en múltiples pruebas experimentales en tramos de prueba en los Estados Unidos (AASHO, 1961; AASHTO, 1986; AASHTO, 1993) y en México (Corro & Prado, 1974), así como una variación realizada por el Instituto del Asfalto (AI, 1970). La principal característica de estos métodos es el Índice de Serviciabilidad Presente (PSI, por sus siglas en inglés de *Present Serviceability Index*) como una medida para evaluar el estado superficial del pavimento derivado del paso de vehículos cargados, reflejándose en la rugosidad longitudinal y transversal, y la introducción del módulo de resiliencia efectivo del suelo de cimentación o de la subrasante, y el módulo de elasticidad como una propiedad fundamental de cualquier material que conforman las capas del pavimento.

La principal desventaja de los métodos empíricos es que solo pueden representar un conjunto limitado de condiciones de los materiales, de la carga e incluso de las consideraciones ambientales del sitio, las cuales al variar estacionalmente afectan la validez de los resultados.

1.2 Nuevos enfoques para el diseño de pavimentos

El desarrollo tecnológico ha impulsado el desarrollo de nuevos enfoques o la adaptación de métodos existentes para el diseño de pavimentos flexibles. Estos incluyen dos conceptos principalmente, el diseño basado en un análisis mecánico, donde las alternativas son evaluadas a través de las respuestas mecánicas de la estructura del pavimento, tales como, esfuerzos, deflexiones, etc.; y el diseño basado en modelos de desempeño con un enfoque mecánico-empírico, el cual es desarrollado mediante modelos mecánicos que combinan estudios de campo (Rauhut & Gendeei, 1987).

La metodología AUTH de diseño de pavimentos flexibles es un procedimiento semianalítico desarrollado originalmente por un grupo de científicos (Nikolaides *et al*, 1997). La metodología de diseño de pavimentos AUTH consiste en nomogramas y tablas que permiten determinar el espesor de todas las capas de pavimento flexible consistente en concreto asfáltico denso con asfalto de grado de penetración (40/50 o 60/70) y capas base/subbases no ligadas (Nikolaides, 2015). La base y la subbase se tratan como una capa unificada. El espesor de esta capa puede ser de 200, 300 o 400 mm, lo que simplifica los trabajos de construcción (la base/subbase se construye en capas de 100 mm de espesor).

En Francia se desarrolló un método para el diseño racional de estructuras de pavimento, lo que significa que no calcula los espesores de un pavimento en función de la vida servicio proyectada, sino que estima el daño acumulativo en el tiempo de una estructura de pavimento propuesta. El catálogo de diseños proporciona espesores de cada capa con respecto a los módulos de subrasante de 20, 50, 120 y 200 MPa y las categorías de ejes estándar acumulados (LCPC & SETRA, 1994).

En 2008, AASHTO propuso un nuevo enfoque para el diseño de pavimentos, con un enfoque mecanicista-empírico (MEPDG, por sus siglas en inglés de *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*). Los pavimentos de dos y tres capas de los métodos mecanicistas se centran en respuestas estructurales medibles calibradas con el comportamiento en servicio de los pavimentos asfálticos como la deflexión superficial o la tensión vertical. El diseño estructural mecanicista se basa en dos principales modelos de deterioro: deformación permanente y fatiga.

Debido a la cantidad de datos, los métodos mecanicistas utilizan diferentes softwares/programas, por ejemplo, Austroads calcula la respuesta a la carga utilizando la teoría lineal y, específicamente el programa informático CIRCLY (Mincad Systems Pty Ltd, 2022), el método racional francés se apoya en el programa ALIZE (IFSTTAR, 2016), el MEPDG calcula las respuestas críticas del pavimento utilizando el programa de teoría de capas elásticas identificado como JULEA integrado en el AASHTOWare (AASHTO, 2018), las tensiones y deformaciones en las capas del pavimento en India se analizan mediante el programa informático IITPAVE utilizado en el método del *Indian Road Congress* (IRC, 2018), el Departamento de Transporte de California (CalTrans) utiliza CalME el cual es un programa informático el cual utiliza un enfoque "Incremental Recursivo" (I-R) que modela todo el proceso de daño (UC-Davis, 2020), el Instituto Mexicano del Transporte desarrolló un método de diseño el programa IMT-Pave con un enfoque mecanicista (Garnica *et al*, 2016), y en Costa Rica el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME) desarrolló un modelo mecanicista para el diseño de pavimentos (CR-ME) (Arias, 2020).

Los métodos mecanicistas-empíricos se basan en la teoría elástica estratificada, la cual modela la estructura como un continuo semi-infinito, dividido en capas de espesor finito sobre un semiespacio elástico (Vasquez-Varela, 2019). Adicionalmente se han desarrollado otras alternativas a la teoría elástica, tales como

el uso del espesor de capa equivalente de Odemark (1949), el cual permite calcular rápidamente las respuestas transformando un medio multicapa en una sola capa con un espesor transformado (Molenaar & Van Gurp, 1980). Por su parte la distribución probabilística de las tensiones permite predecir esfuerzos en pavimentos flexibles con el teorema del límite central de probabilidad y un coeficiente de tensión lateral para cada material (Freeman & Harr, 2004). Adicionalmente Ghanizadeh & Ahadi (2015), han trabajado en redes neuronal artificiales para analizar la estructura del pavimento flexible y determinar sus respuestas críticas bajo la influencia de una carga por eje estándar. Los modelos de elementos finitos se han aplicado ampliamente al diseño y análisis de estructuras de pavimento. Se han utilizado tres tipos de modelos para estudiar estructuras de pavimento multicapa: deformación plana, axisimétrico y tridimensional (3-D) (Cho *et al*, 1996).

La mayoría de los métodos mecanicistas o mecánico-empíricos tiene la posibilidad de considerar el clima como parte de las variables de diseño, a través de variables como la precipitación y la temperatura.

1.3 Consideraciones del clima en los métodos de diseño de pavimentos

El clima sirve como un insumo esencial en el diseño del pavimento y, dependiendo de su variabilidad, puede tener un impacto significativo en el desempeño del pavimento (Li, 2011). Sin embargo, el clima es considerado en varios casos de manera implícita dentro de las propiedades de los materiales, y solo en los métodos más recientes de manera explícita.

La Comisión de Carreteras del Estado de Kansas (1947), mediante la fórmula para determinar el espesor de pavimento requerido, consideró el coeficiente de saturación del suelo en función de la precipitación promedio anual. La fórmula para determinar el espesor de pavimento requerido es la siguiente:

$$T = \left[\sqrt{\left[\frac{3Pmn^2}{2\pi CS} \right]^2 - a^2} \right] \left[\sqrt[3]{\frac{C}{Cp}} \right]$$

Donde:

T = Espesor requerido en pulgadas

Cp = Módulo de deformación del pavimento o de la capa superficial en (psi)

C = Módulo de deformación de subrasante o subbase (psi)

p = Carga de una sola rueda (lbs)

a = Radio del área de contacto del neumático (pulgadas)

S = Deflexión de superficie permitida (pulgadas)

m = Coeficiente de tránsito (Tabla 1.1)

n = Coeficiente de saturación (Tabla 1.2)

El nivel de saturación se obtuvo de diversos registros realizados en carretera para llegar a los valores del coeficiente de saturación que se utilizarán en el análisis. La tabla 1.1 muestra los valores para el coeficiente de saturación.

Tabla 1.1 Coeficiente del tránsito

Coeficiente del tránsito (m)	Carga de la rueda (lb)	Tránsito total (vehículos/día)
1	9,000	> 1,500
5/6	7,500	900 – 1,500
2/3	6,000	300 – 900
1/2	4,500	50 – 300

Fuente: State Highway Commission of Kansas, 1947.

Tabla 1.2 Coeficientes de saturación

Coeficiente de saturación (n)	Precipitación Promedio Anual (in)
1.0	35.0 – 45.0
0.9	30.0 – 34.9
0.8	25.0 – 29.9
0.7	20.0 – 24.9
0.6	15.0 – 19.9

Fuente: State Highway Commission of Kansas, 1947.

El método AASHTO (1961), consideró un factor de ajuste regional debido al clima, ya que se había detectado que las condiciones climáticas y del suelo de cimentación de las pruebas realizadas correspondían a un solo sitio, y por lo tanto los resultados solo eran válidos para ese lugar. El factor regional variaba de 0.5 a 5 como se muestra en la Figura 1.2, dependiendo del periodo del tiempo en que suelo de cimentación estuviera congelado, seco o saturado.

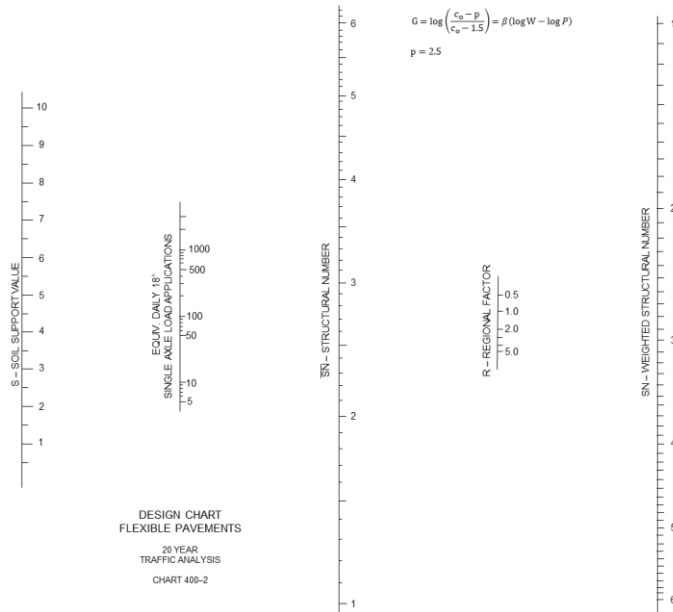


Figura 1.2 Diagrama de diseño de pavimentos flexibles en el sistema interestatal

Fuente: TRB, 2007.

La forma de considerar las variaciones climáticas del suelo de cimentación era a través del valor de soporte del suelo y el factor regional, sin embargo, consideraba un valor único para la determinación de los espesores, y por lo tanto fallaba al no considerar la variabilidad estacional.

La actualización del método AASHTO (1986), consideró que el medioambiente puede afectar el desempeño del pavimento en diferentes maneras. La guía introdujo el “Módulo de Resiliencia Efectivo” del suelo de cimentación o de la subrasante, cuyo propósito de identificar los módulos estacionales es cuantificar el daño relativo al que está sometido un pavimento durante cada estación del año, tal y como se muestra en la Figura 1.3.

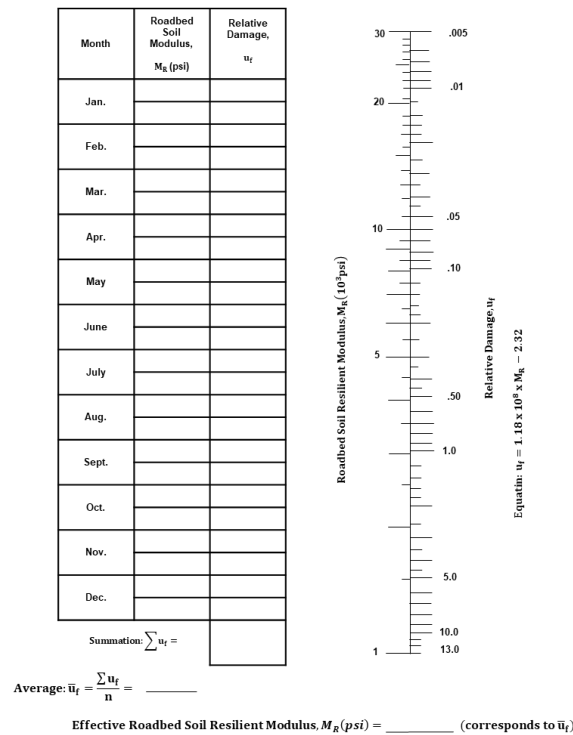


Figura 1.3 Nomograma para estimar el módulo de resiliencia efectivo del suelo de cimentación para pavimentos flexibles utilizando el criterio de serviciabilidad

Fuente: AASHTO, 1986.

La guía AASHTO considera también un “Coeficiente de Drenaje”, ya que drenaje de agua en los pavimentos es una importante consideración en el diseño de carreteras. El exceso de agua en las capas del pavimento, particularmente las conformadas por materiales granulares, en combinación con los esfuerzos debido a tránsito pueden generar daños prematuros en la estructura del pavimento. Los coeficientes de drenaje son: valores menores, iguales o mayores a la unidad, esto depende de la calidad percolante de las capas, los cuales se ilustran en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3 Valores recomendados de “m” para modificar los coeficientes de capa en materiales granulares de base y subbase

Calidad del drenaje	Porcentaje de tiempo en que la estructura del pavimento está expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación			
	Menor que 1 %	1 – 5 %	5 – 25%	Mayor que 25%
Excelente	1.40 – 1.35	1.35 – 1.30	1.30 – 1.20	1.20
Bueno	1.35 – 1.25	1.25 – 1.15	1.15 – 1.00	1.00
Regular	1.25 – 1.15	1.15 – 1.05	1.00 – 0.80	0.80
Malo	1.15 – 1.05	1.05 – 0.80	0.80 – 0.60	0.60

Fuente: AASHTO, 1986.

En el MS-01 del Instituto del Asfalto consideró que las condiciones medioambientales afectan de manera adversa las propiedades de soporte de los materiales de la subrasante. Los tres principales parámetros críticos son la humedad, la expansión del suelo, y el congelamiento. Estos pueden ser representados por el valor de soporte (CBR) y el valor de resistencia (R-Value) (AI, 1970). El valor de diseño de la subrasante es el 90% de todos los valores obtenidos de la prueba CBR del suelo de subrasante en el sitio de diseño. El cálculo número se obtiene de acuerdo con la tabla de la Figura 1.4, cuyos porcentajes calculados son graficados como se ilustra Figura 1.5.

CBR	Number equal to or greater than	Percent equal to or greater than
6	11	$(11/11)100 = 100$
7		
7	10	$(10/11)100 = 90.9$
8	8	$(8/11)100 = 72.7$
9		
9	7	$(7/11)100 = 63.6$
10		
10	5	$(5/11)100 = 45.4$
11		
11	3	$(3/11)100 = 27.3$
12	1	$(1/11)100 = 9.1$

Figura 1.4 Porcentaje de valores de CBR iguales o mayores para cada valor

Fuente: AI, 1970.

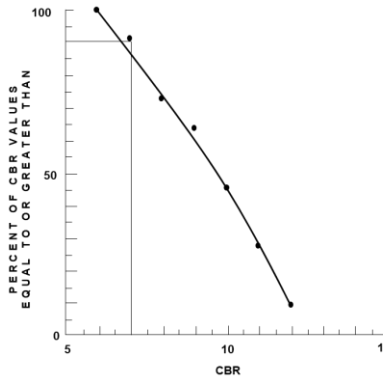


Figura 1.5 CBR de diseño para la subrasante

Fuente: AI, 1970.

Las actualizaciones del método del Instituto del Asfalto consideraron el módulo de resiliencia en sustitución del CBR, y la incorporación de la temperatura para la determinación del espesor de capa de concreto asfáltico. En el método para simular los efectos de la temperatura a través del tiempo (variación estacional), se basó en un estudio donde se relacionó los módulos-temperatura y las propiedades del asfalto. Las gráficas para determinar los espesores consideran tres tipos de clima y rangos de temperatura. Un ejemplo adaptado del Instituto del Asfalto por la Secretaría de Integración Económica Centroamericana se muestra en la Figura 1.6 (SIECA, 2002). La versión 1999 del Manual considera un espectro más amplio de temperaturas (AI, 1999).

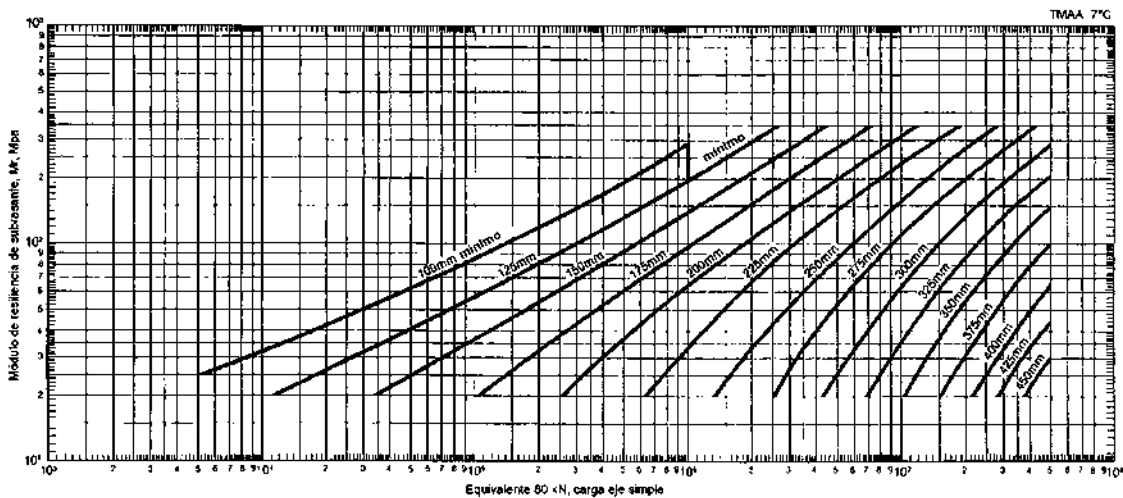


Figura 1.6 Espesor del concreto asfáltico para clima frío

Fuente: SIECA, 2002.

El método UNAM utilizado en México, establece que las condiciones meteorológicas influyen en la capacidad de soporte del suelo (VRS), por lo que el valor relativo de soporte crítico para diseño considera un coeficiente de variación que incluye la incertidumbre debido al clima. Para la determinación de este valor se recomienda zonificar la carretera para tomar en cuenta las condiciones climatológicas y geotécnicas, regionalizar adecuadamente las zonas climáticas del país y con ello estimar el valor crítico del VRS (Corro *et al*, 1981).

El método Shell (1978) considera la variación de la temperatura, la cual no tiene un efecto significativo sobre el módulo de resiliencia de los materiales granulares, pero si tiene una fuerte influencia en las propiedades del asfalto. Para incorporar la temperatura se introduce un parámetro que pondera la temperatura media anual del aire (w-MAAT, del inglés *Weighted Mean Anual Air Temperature*), la cual se obtiene de la temperatura media mensual del aire par aun sitio específico. La información de la temperatura media se obtiene de estaciones meteorológicas generalmente. El parámetro w-MAAT es obtenido mediante el gráfico de la Figura 1.7.

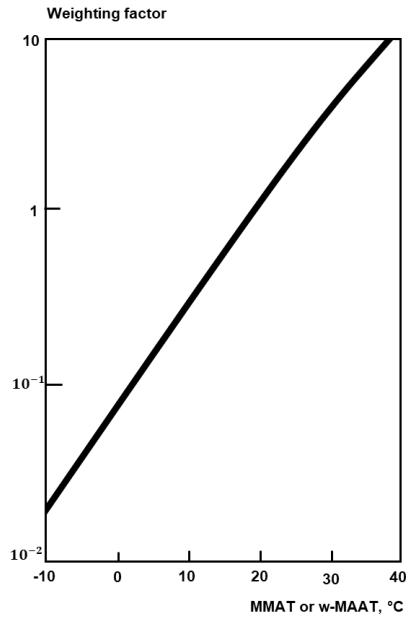


Figura 1.7 Curva de ponderación de la temperatura

Fuente: Shell International Petroleum Company, 1978.

Para cada temperatura media mensual del aire se obtiene un factor de ponderación, los cuales son promediados aritméticamente, para posteriormente con este valor promedio obtener la temperatura media anual del aire ponderada (w-MAAT). Este cálculo se apoya en la tabla de trabajo de la Figura 1.8.

(1) Month	(2) MMAT, °C	(3) Chart W: Weighting factor
January	8	0.21
February	8	0.21
March	12	0.36
April	16	0.62
May	19	0.93
June	22	1.40
July	26	2.35
August	28	3.00
September	22	1.40
October	19	0.93
November	12	0.36
December	6	0.16
(4) Total of weighting factors		11.93
(5) Average of weighting factor		say 1.0
(6) Chart W: w-MAAT, °C		19.5 say 20

Figura 1.8 Tabla de trabajo para la determinación de la temperatura media anual del aire ponderada (w-MAAT)

Fuente: Shell International Petroleum Company, 1978.

El valor de w -MAAT es utilizada en los gráficos para determinar los espesores de la carpeta asfáltica, en función del espesor de la base y el módulo de la subrasante, y el tipo de mezcla asfáltica (se consideran 8 tipo de mezclas), el número de ejes acumulados durante la vida útil (ejes de 80kN), y temperaturas (4, 12, 20 y 28°C). La Figura 1.9 muestra un ejemplo de gráficos para la determinación del espesor de la carpeta asfáltica.

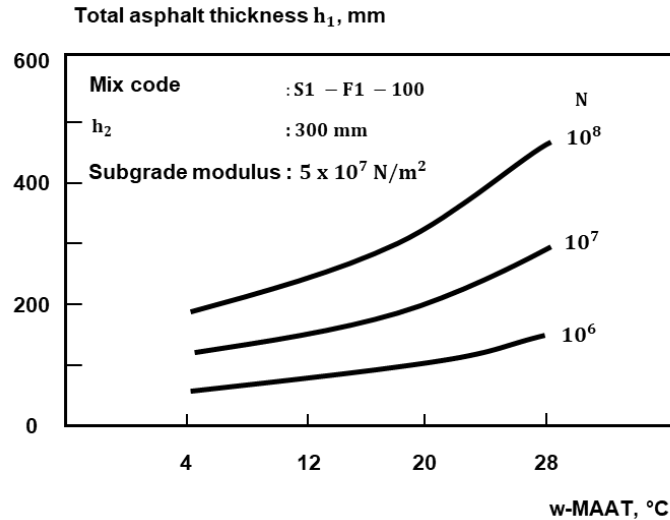


Figura 1.9. Ejemplo de gráfico para la determinación de espesores de la carpeta asfáltica del método Shell

Fuente: Shell International Petroleum Company, 1978.

El método francés considera en su diseño la siguiente información ambiental como relevante: el estado hídrico del suelo de apoyo, ciclos estacionales de temperatura, y la intensidad de los periodos de heladas. El estado hídrico del suelo de apoyo establece el uso de la situación más desfavorable en el sitio del proyecto. El método de diseño francés recomienda el uso de la regla de Miner para calcular la temperatura equivalente, para considerar los ciclos estacionales de la temperatura, y su sensibilidad en las propiedades de deformabilidad y resistencia de los materiales asfálticos. Sobre las heladas, utiliza un índice de helada atmosférica elegido como referencia (IR) y un índice de helada permitido (IA) (LCPC & SETRA, 1994).

La guía de diseño mecánico-empírico de pavimentos (MEPDG, por sus siglas en inglés) de AASHTO (2008) establece un análisis climático/medioambiental, dentro del cual se incluye a la temperatura y la humedad como variables ambientales. La forma de incorporar la información climática al diseño MEPDG, es mediante el "Modelo Climático Integrado". Este programa fue reconocido como el modelo más completo que aborda los efectos del clima en los pavimentos (Lytton *et al*, 1989). La versión original fue analizada y adaptada (Solaimanian & Bolzan, 1993; Larson & Dempsey, 1997), y denominada "Modelo Climático Integrado Mejorado" (EICM, por sus siglas en inglés), la cual ha sido actualizada, calibrado y validado en diferentes investigaciones (NCHRP, 2008; CalTrans, 2004).

El EICM en conjunto permite predecir o simular patrones de comportamiento de las características del pavimento y de los materiales junto con condiciones ambientales de diversas variables meteorológicas que se utilizan en el método de diseño MEPDG. Para estimar el módulo de resiliencia en equilibrio de suelo de cimentación o de la subrasante se realiza mediante un factor ambiental que es obtenido mediante el EICM como se muestra en la Figura 1.10, y multiplicarlo por el módulo de resiliencia óptimo.

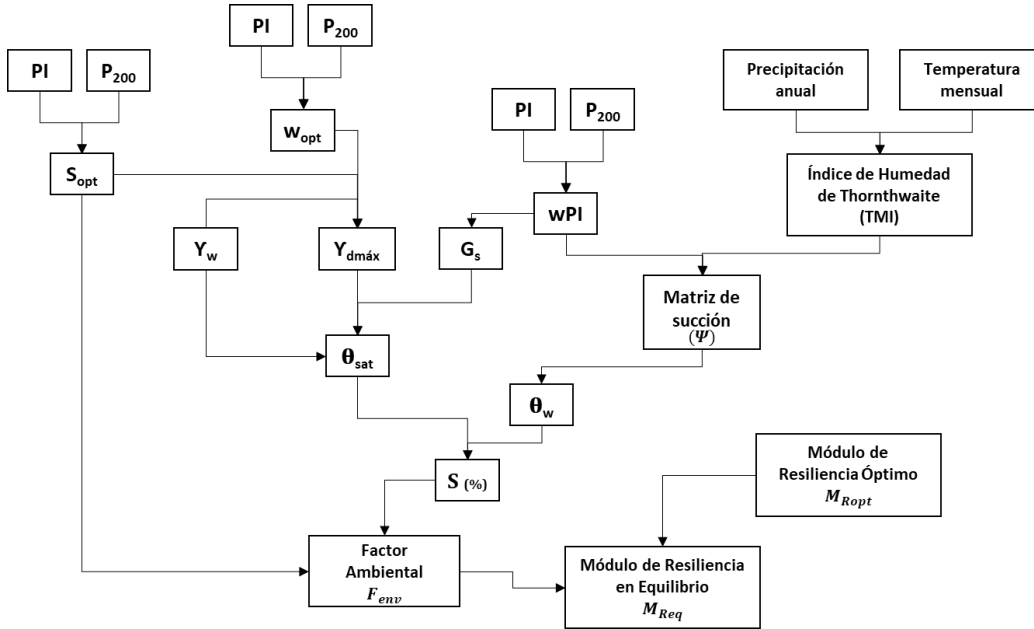


Figura 1.10. Diagrama de flujo del EICM

Fuente: Elaboración propia, basada en Rosenbalm, 2011.

Donde, S es el grado de saturación (%), θ_w es el contenido volumétrico del agua, θ_{sat} es el contenido volumétrico saturado de agua, γ_d es la densidad seca del suelo, γ_w es la densidad del agua, G_s es la gravedad específica del suelo, w_{opt} es el contenido de humedad óptimo de compactación, wPI es el índice de plasticidad ponderado, P_{200} es el porcentaje que pasa la malla, PI es el índice de plasticidad (%) y ψ es la matriz de succión del suelo

El módulo climático del MEPDG calcula las condiciones de temperatura y humedad en toda la estructura del pavimento cada hora, por ejemplo, las temperaturas de cada subcapa de HMA (*Hot Mix Asphalt*) se combinan en cinco quintiles (cinco grupos sucesivos, del 20% cada uno, de los valores calculados) para cada mes del período de análisis de los deterioros relacionados con la carga. Se supone que la distribución de frecuencias de las temperaturas de la HMA utilizado tiene una distribución normal como se muestra en la Figura 1.11. La temperatura media dentro de cada quintil de una subcapa para cada mes se utiliza para determinar el módulo dinámico de esa subcapa.

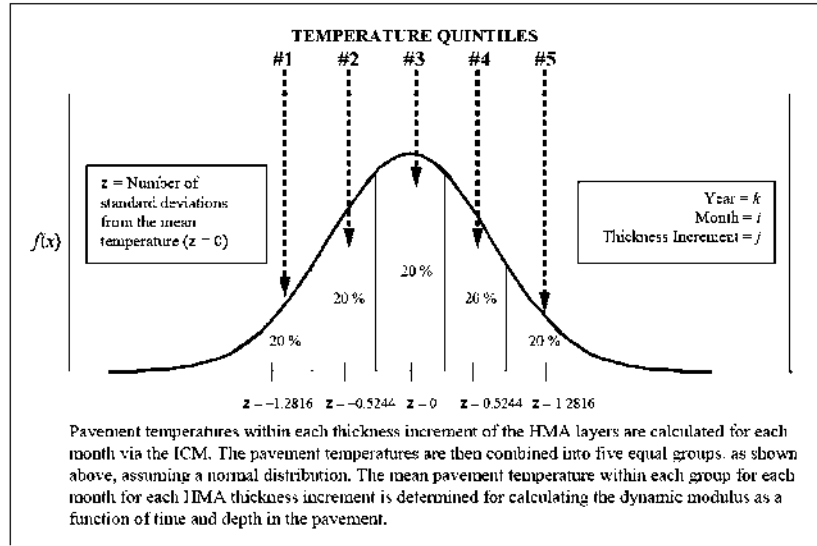


Figura 1.11 Ilustración gráfica para 5 quintiles usados en el MEPDG para determinar las propiedades de las mezclas HMA

Fuente: AASHTO, 2008.

El método CalME (Caltrans Mechanistic-Empirical) utiliza el EICM igual que el MEPDG de AASHTO, mediante una base de datos previamente calculada de manera externa, lo cual hace que el proceso de diseño sea más rápido. CalME calcula las temperaturas por debajo de la superficie a través del método de elementos finitos unidimensional (Harvey & Basheer, 2011).

1.4 Variables de los métodos de diseño ligados al clima

Derivado del análisis de los métodos de diseño, y de manera específica de como consideran el clima del sitio, para evaluar sus efectos en las diferentes capas del pavimento, se identificaron para cada una de las capas la propiedad mecánica mediante la cual se puede considerar el clima y su variabilidad en los métodos de diseño actuales, así como futuras adaptaciones del método mecánico-empírico para pavimentos.

Para la carpeta asfáltica es importante considerar el comportamiento de la rigidez del asfalto. Esta propiedad tendrá diferentes proporciones, las cuales dependen del tiempo de carga y de la temperatura a la que se aplica la carga (Shell International Petroleum Company, 2015). El módulo dinámico se utiliza para calcular las deformaciones horizontales y verticales de una mezcla asfáltica y permite determinar la deformación permanente máxima dentro de cada capa y la ubicación del daño máximo por fatiga, donde existe una clara relación entre los módulos y la temperatura.

Las variaciones horizontales y verticales en los tipos de suelo del suelo de cimentación, los contenidos de humedad, las densidades, la profundidad del nivel freático y la succión deben considerarse durante el proceso de diseño del

pavimento. Es por ello que el módulo de resiliencia es un parámetro mecánico importante para representar estas propiedades, así como su variación estacional para el caso del suelo de cimentación o subrasante.

Los materiales de base y subbase se utilizan como capa de drenaje y controlan la ascensión capilar de agua, protegiendo así a la estructura de pavimento, por lo que generalmente se usan materiales granulares. El contenido de humedad medio mensual en relación con el contenido de humedad óptimo se debe utilizar para ajustar el módulo de resiliencia de cada subcapa no ligada para considerar las variaciones del módulo en función del contenido de agua.

AASHTO (1986), introdujo el módulo de resiliencia efectivo del suelo de cimentación o de la subrasante, cuya variable permite estimar un valor único ponderado de los módulos estacionales, ya que las condiciones meteorológicas influyen en la capacidad de soporte del suelo. El contenido de humedad de un suelo tiene un fuerte impacto en el valor del módulo de resiliencia, ya que éste disminuye cuando se incrementa el contenido de humedad.

1.5 Principales hallazgos de la revisión de los métodos de diseño

La revisión crítica de los métodos de diseño de pavimento muestra que no incorporan adecuadamente el clima (precipitación y temperatura), con excepción del MEPDG que lo hace a través del EICM.

Por ejemplo, para incorporar el efecto de la precipitación en los materiales granulares, se realiza de manera implícita a través de los módulos de resiliencia para suelos en la subrasante, sin embargo, no consideran su variación estacional. Únicamente AASHTO (en su versión 86 y 93) permite obtener un módulo de resiliencia efectivo para el suelo de cimentación o subrasante, pero requiere múltiples mediciones en campo para poder determinarse, lo cual encarece los proyectos y por lo tanto no se realizan el número necesario de pruebas. En algunos métodos sugieren medir en la condición más desfavorable del año.

En el caso de la temperatura esta fue considerada tanto en el método del Instituto del Asfalto, como el método SHELL, en ambos casos la temperatura es considerada de manera directa o ponderada para determinar el espesor de la carpeta asfáltica. La temperatura ponderada permite considerar la variación estacional de la temperatura, mientras que para el MEPDG transforma en quintiles las temperaturas para determinar las propiedades de las mezclas asfálticas.

La Tabla 1.1 resume las variables climáticas identificadas en los métodos de diseño de pavimentos en las cuales se pueden incorporar adecuadamente el clima y su variación climática.

Tabla 1.1 Variables climáticas para el diseño de pavimentos

CAPA DEL PAVIMENTO	PROPIEDAD MECÁNICA	COMPONENTE AMBIENTAL
CARPETA	Módulo dinámico	<ul style="list-style-type: none">• Temperatura
BASE	Módulo de resiliencia	<ul style="list-style-type: none">• Contenido de agua• Humedad
SUB-BASE	Módulo de resiliencia	<ul style="list-style-type: none">• Contenido de agua• Humedad
SUELO DE CIMENTACIÓN	Módulo de resiliencia	<ul style="list-style-type: none">• Contenido de agua• Humedad• Grado de saturación• Succión

Fuente: Mendoza *et al*, 2022.

Para considerar estas propiedades en el diseño de pavimentos es necesario desarrollar metodologías mediante las cuales se puedan incorporar las condiciones climáticas históricas, actuales y futuras en un sitio, para que se puedan se incorporar en los modelos de deterioro en los métodos de diseño de pavimento mecánico-empíricos o para el caso de los métodos empíricos se puede a través del módulo de resiliencia para los materiales granulares.

2. Propuesta metodológica para incorporar el cambio climático en el diseño de pavimentos

Los pavimentos deben ser construidos para que sean duraderos y resilientes, y que funcionen satisfactoriamente durante toda su vida útil (Li *et al*, 2011). Por lo que el principal desafío que se tiene en todos los países es prolongar la vida de diseño y vida remanente de un pavimento.

Las estructuras de pavimento suelen estar expuestas a cargas mecánicas y ambientales complejas y de gran magnitud (Mulugeta *et al*, 2023). Las principales fallas en los pavimentos se deben principalmente al daño a la fatiga y la deformación permanente (Baladi, 1998; Sudarsanan & Kim, 2022; Uzan, 2004).

Como se dijo en el capítulo anterior, las condiciones medioambientales tienen un efecto significativo en el desempeño de los pavimentos (Zapata *et al*, 2007). Sin embargo, solo algunos métodos de diseño de pavimento consideran adecuadamente el clima del sitio para donde se está diseñando el pavimento.

Por eso es importante que los métodos de diseño de pavimentos consideren el clima, pero también consideren el cambio climático. De acuerdo con el Panel Intergubernamental de Cambio Climático, el cambio climático está afectando a muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos en todas las regiones del planeta (IPCC, 2023).

Esto nos hace plantear, que, si bien el clima ya tenía un efecto adverso sobre la vida útil de un pavimento, este se verá agravado por el cambio climático. El cambio climático tiene efectos significativos en el desempeño del pavimento y, por lo tanto, debe incorporarse al procedimiento de diseño del pavimento (Qiao, 2013).

En el presente capítulo se plantea una propuesta práctica para incorporar el cambio climático en los métodos de diseño de pavimentos, particularmente en el módulo de resiliencia del suelo de subrasante o cimentación mediante el Índice de Humedad de Thornthwaite (TMI), el cual puede incorporar el clima del sitio del proyecto y su variabilidad futura en función de las proyecciones del cambio climático.

La propuesta se basa en el enfoque mecánico-empírico del MEPDG de AASHTO, el cual utiliza el Modelo Climático Integrado Mejorado (EICM), mediante el cual se estima un factor ambiental que incorpora los cambios de humedad del suelo e impacta en la capacidad estructural de la subrasante, representada por el módulo de resiliencia.

2.1 Impacto climático en los pavimentos

2.1.1 Influencia del clima en los pavimentos

Sirin *et al* (2019) identificaron 29 factores que afectan el desempeño del pavimento, de los cuales 3 de ellos están asociados a factores medioambientales (condiciones climáticas extremas, precipitación intensa y los ciclos de congelamiento-descongelamiento). Estos factores dan complejidad al diseño de pavimentos, ya que estos influyen en la tasa de deterioro y la pérdida de serviciabilidad ilustrada en la Figura 1.

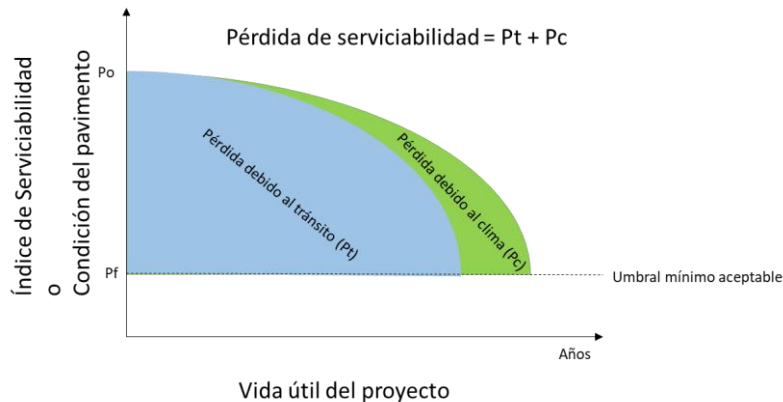


Figura 2.1 Pérdida de serviciabilidad debido a dos principales factores (tránsito y clima).

Fuente: Elaboración propia, basada en Haas (2001).

Las investigaciones en pavimentos, principalmente se han centrado en el daño asociado a las cargas del tránsito (Bhandari *et al*, 2023; Gao *et al*, 2019) y la sobrecarga (País *et al*, 2013; Rys *et al*, 2015).

Para evaluar el efecto del clima en los pavimentos, algunas investigaciones evaluaron las correlaciones entre las propiedades estructurales del pavimento (representadas por los módulos elásticos de las capas), los factores climáticos (representados por las condiciones de temperatura y humedad del pavimento) y el comportamiento de las propiedades de los materiales. Los resultados evidenciaron una estrecha correlación entre el clima y los módulos de las capas del pavimento (Ali & Lopez, 1996; Ackah *et al*, 2021; Meagher *et al*, 2012; Teltayev & Suppes, 2019)

La temperatura tiene una influencia mayor en el desempeño de las carpetas asfálticas en pavimentos flexibles, de tal manera que las tensiones inducidas por el tránsito y la temperatura son la causa de las fallas en los pavimentos (Wistuba & Walther, 2013; Xueying *et al*, 2020).

Las inundaciones y su impacto en los pavimentos también han sido estudiadas en diferentes investigaciones, ya que un pavimento al estar sometido a condiciones de inundación afecta la durabilidad del pavimento y su calidad superficial, de manera

particular el nivel de profundidad y la duración de la inundación (Mallick *et al*, 2018; Salar *et al*, 2014; Lu *et al* 2018).

La rigidez del suelo de la subrasante, que depende del contenido de humedad in situ y de las características del índice del suelo, es un factor clave en el ahuellamiento del pavimento (Rahman *et al*, 2023). La condición de humedad de la subrasante del pavimento es crítica porque afecta directamente a la resistencia y rigidez de la estructura del pavimento (Perera *et al*, 2012), ya que la succión de equilibrio tiene una influencia directa en el módulo de resiliencia del suelo de la subrasante (Saha *et al*, 2019).

El análisis de las investigaciones sobre la influencia del clima en los pavimentos demuestra que este tiene un impacto significativo en su desempeño y durabilidad, por lo tanto, es importante considerarlo en el diseño de pavimentos, ya sea por métodos empíricos o mecanicistas.

2.1.2 Impacto del cambio climático en los pavimentos

El riesgo potencial del cambio climático ha despertado especial interés en evaluar cómo puede afectar las tasas de deterioro de los pavimentos flexibles y cómo se alteraría la vida útil del pavimento como consecuencia (Qiao *et al*, 2013).

La influencia del cambio climático en los pavimentos ha sido abordada en diversos estudios (Mills *et al*, 2007; TRL, 2008; Muench & Van Dam, 2015), donde se demuestra como los cambios en el clima impactan el diseño y el desempeño de los pavimentos. Por lo tanto, es importante tener acceso a datos climáticos para identificar los factores que explican el desempeño pasado del pavimento y hacer estimaciones del desempeño futuro probable (Austroads, 2010).

Para evaluar el impacto del cambio climático se han evaluado diversos factores ambientales y su comportamiento utilizando la guía de diseño mecánico-empírico de pavimentos (MEPDG), donde concluyen que los factores de temperatura, tanto el aumento de la temperatura promedio anual como la variación estacional, son los elementos más influyentes en el desempeño del pavimento (Qiao *et al*, 2013; Meagher *et al*, 2012; Mills *et al*, 2009). Conclusiones similares se obtuvieron mediante el Programa informático de diseño mecanicista-empírico de pavimentos asfálticos (MnPAVE) (Tanquist, 2001; Knott *et al*, 2019), donde además se debe aumentar el espesor de la carpeta asfáltica para conservar el mismo periodo de diseño de pavimento, debido al efecto incremental de la temperatura.

El cambio climático también influye en el mantenimiento de los pavimentos, en las técnicas de conservación (Wang *et al*, 2012), en los regímenes de mantenimiento durante la vida útil del pavimento (Taylor & Philp, 2015a), y las implicaciones económicas durante el ciclo de vida del pavimento (Qiao *et al*, 2019).

En los últimos años, ha aumentado el interés por determinar la influencia de los cambios de humedad en el módulo de resiliencia de los suelos de subrasante bajo estructuras de pavimento (Naji, 2016; Teltayev & Suppes, 2019). Estas variaciones

se deben a la fluctuación estacional de la humedad del suelo debido a las precipitaciones, las cuales también se verán modificadas por el cambio climático.

Los cambios en la precipitación debido al cambio climático influyen en el comportamiento del suelo de cimentación y subrasante, cuando esta aumenta, el nivel de saturación se incrementa y se reduce la capacidad estructural del pavimento, y en el caso de la sequía, las propiedades de la subrasante son menos susceptibles a los cambios (Muench & Van Dam, 2015; PIARC, 2012).

Para que los pavimentos puedan responder adecuadamente ante el cambio climático, es necesario adaptarlos. Esto implicará actualizar o modificar los métodos de diseño, para considerar el cambio climático en un dimensionamiento adecuado, para que se pueda garantizar la durabilidad en su ciclo de vida y asegurar su resiliencia al clima.

El clima y el cambio climático debe ser incorporado a los métodos de diseño de pavimentos, y cada región/país debe desarrollar la forma de hacerlo, considerando la información del clima y las proyecciones del cambio climático para el sitio de proyecto.

2.2 Una aproximación para considerar el cambio climático en el diseño de pavimentos

Para considerar el cambio climático es necesario modelar escenarios climáticos que incluyan el ciclo de carbono en la atmósfera. Los escenarios son de utilidad para el análisis del cambio climático y, en particular, para la creación de modelos del clima, para la evaluación de los impactos y para las iniciativas de adaptación y de mitigación (IPCC, 2000).

La aplicación del EICM del MEPDG puede continuar siendo una excelente herramienta de entrada para incorporar el clima en los métodos de diseño, sin embargo, se debe considerar la variación climática futura esperada conforme algún escenario climático seleccionado para la región del proyecto.

2.2.1 Descripción de la metodología

Este estudio sugiere incorporar las variables climáticas de temperatura y precipitación con base en datos históricos obtenidos de estaciones meteorológicas cercanas al sitio del proyecto y los cambios proyectados obtenidos a través de modelos de circulación general con base en los posibles escenarios climáticos definidos en el último reporte del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (AR6) (IPCC,2023).

La información climática histórica y su variación futura puede ser incorporada en el EICM a través del Índice de Humedad de Thornwaite (TMI) el cual permite calcular la matriz de succión y con el grado de saturación obtenido de la caracterización del suelo del sitio de proyecto se puede determinar el Factor Ambiental (F_{env}) (Zapata *et al*, 2007). Este factor ambiental incorpora la variación climática estacional con

base en datos históricos de precipitación y temperatura, pero también puede incorporar la variación futura esperada de las variables climáticas, tal y como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 2. Finalmente, el factor ambiental se multiplica por el módulo de resiliencia óptimo, y se obtiene un módulo de resiliencia en equilibrio.

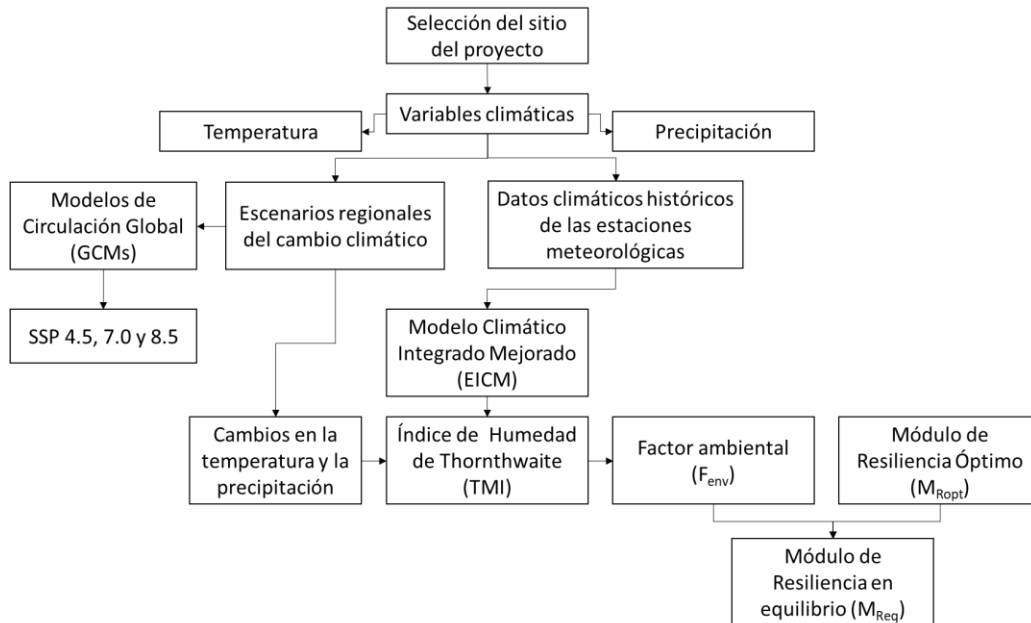


Figura 2.2 Diagrama de flujo para incorporar el cambio climático en el módulo de resiliencia

Fuente: Elaboración propia.

Este esquema es de utilidad para determinar el Módulo de Resiliencia en Equilibrio en suelos granulares sueltos que se utilizarán como suelo de cimentación y subrasante, pero también se puede utilizar en los materiales que serán utilizados en capas de base y subbase.

La ventaja de hacerlo en un proceso independiente como el propuesto, es que estos valores de módulo de resiliencia que se obtendrán pueden ser aplicados en métodos mecánico-empíricos, pero también en los métodos empíricos tradicionales que son ampliamente utilizados.

2.2.2 Escenarios climáticos

Las proyecciones futuras del clima son evaluadas mediante múltiples modelos ensamblados de baja escala (Underwood, 2019). Los escenarios climáticos están basados en el uso de estos modelos numéricos.

El uso de modelos tales como los Modelos de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés) proveen una base científica para estimar y proyectar el cambio climático bajo diferentes escenarios (Swarna, 2022). Los modelos han sido utilizados en todo el mundo para proyectar los cambios del clima a escala global y

regional, y en una escala más reducida, estos modelos han sido utilizados en México para estimar los cambios estimados en el clima.

De los escenarios climáticos se pueden obtener los cambios futuros esperados de temperatura y precipitación para el sitio en donde se pretenda diseñar un pavimento e incorporarlo en el cálculo del TMI.

De acuerdo con el AR6 [8], se utilizarán los siguientes escenarios:

- SSP5, RCP 8.5 (Escenario alto)
- SSP3, RCP 7.0 (Escenario de medio a alto)
- SSP2, RCP 4.5 (Escenario medio)

Para facilitar la obtención de las estimaciones futuras, la plataforma SICliC cuenta los mapas de proyecciones futuras desarrollados por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), quien es responsable de las políticas de cambio climático en México, con proyecciones a corto plazo (2021-2040), mediano plazo (2041-2060) y largo plazo (2081-2100) (INECC, 2022; INECC, 2023). Para este proyecto se utilizarán escenarios con un horizonte a corto plazo, de acuerdo con la vida útil de un pavimento.

Las proyecciones de temperatura y precipitación son obtenidas de estos mapas, mediante la ubicación geoespacial del sitio del proyecto, las cuales se incorporarán a los datos climáticos históricos, y con ello obtener un TMI considerando el cambio climático con diferentes escenarios.

2.2.3 Índice de Humedad Thornthwaite

En 1948, Thornthwaite introdujo el Índice de Humedad Thornthwaite (TMI, por sus siglas en inglés), como un índice que clasificaba el clima de un determinado lugar usando el ciclo natural del clima (Thornthwaite, 1948).

Russam & Coleman (1961), examinaron la relación entre las condiciones de humedad de la subrasante y el balance hídrico climático, presentando evidencias de una relación entre la succión de la humedad del suelo en la subrasante y el Índice de Humedad de Thornthwaite (TMI). Este modelo fue incorporado al Modelo Climático Integrado (ICM, por sus siglas en inglés de Integrated Climate Model) para predecir el comportamiento de la humedad en la subrasante (Lytton *et al* 1989).

Con el fin de utilizar el concepto de TMI no sólo para los sitios ubicados en los EE. UU., sino también para los sitios ubicados fuera de los EE. UU., Witczak *et al* (2006) desarrollaron la siguiente ecuación:

$$TMI = 75 \left(\frac{P}{PET} - 1 \right) + 10 \quad (2.1)$$

Donde, P es la precipitación mensual (cm), PET es el potencial de evapotranspiración.

Para determinar el TMI anual, se requiere el calcular para cada mes el potencial de evapotranspiración (PET), de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$PET = f_1 f_2 1.6 \left(\frac{10t}{I} \right)^a \quad (2.2)$$

Donde, f_1 es la fracción del número de días en el mes dividida por el número medio de días en el mes que es de 30 días, f_2 es la fracción del número de horas en un día dividida por la base de 12 hora diarias de sol en un día, t es la temperatura media mensual en grados Celsius, I es el índice de calor anual, a es un coeficiente.

Para obtener el coeficiente “ a ” es a través de la siguiente expresión:

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^3 - 1.792 \times 10^{-2} I^3 + 0.49239 \quad (2.3)$$

El valor del PET puede ser ajustado dependiendo de la latitud y el mes del año, a través de la ecuación siguiente:

$$PET' = PET_i \frac{D_i N_i}{30} \quad (2.4)$$

Donde, PET' es el potencial de evapotranspiración ajustado, D_i es el factor de corrección para la duración del día de acuerdo con la latitud, N_i es el número de días del mes. Los factores de ajuste se encuentran en Zapata et al (2019).

El TMI se utiliza dentro del modelo EICM para el diseño de pavimentos mecánico-empírico del MEPDG-AASHTO. El TMI también es utilizado como una variable en los modelos de deterioro de los pavimentos (Taylor & Philp, 2015b).

2.2.4 Factor ambiental

Para incorporar las variaciones estacionales del TMI en los módulos de las propiedades del suelo o materiales granulares, se requiere de un factor ambiental.

Como parte del proyecto NCHRP 1-37A, se desarrolló un modelo empírico que tiene en cuenta los efectos de la humedad en el módulo de resiliencia mediante el uso de un factor ambiental para materiales granulares no congelados (F_U) que afecta al módulo inicial/óptimo o al compactado (M_{R-opt}) (Witczak et al, 2000). El modelo es representado por:

$$M_R = F_U M_{R-opt} \quad (2.5)$$

Donde, F_U es la relación entre el M_R en un momento dado (en equilibrio) y el módulo resiliente en condiciones óptimas M_{Ropt} .

El modelo desarrollado por Witczak et al (2000), para estimar el factor ambiental, fue mejorado por Cary & Zapata (2010), ya que demostraron que el factor ambiental para materiales granulares no congelados (F_U), se encontraba subestimado para materiales de grano fino, con alta plasticidad, en condiciones secas (áridas). Futuras

simplificaciones del modelo permitieron considerarlo como el modelo universal para estimar el factor ambiental dentro del EICM (Rosenbalm, 2011), mediante la siguiente ecuación:

$$F_{env} = 10^{1.002 \left[a^{-1} + \frac{\beta - a^{-1}}{1 + e^{\ln\left(\frac{-\beta}{a^{-1}}\right) + \gamma \left(\frac{S - S_{opt}}{100}\right)}} \right]} \quad (2.6)$$

Donde, $\alpha = (-0.6) + (-1.87194)e^{-wPI}$, $\beta = 0.8 + 0.08(wPI)^{0.5}$, $\gamma = (11.96518 + (-10.19111)e^{-wPI})^{0.5}$, wPI es el índice de plasticidad ponderado y $S - S_{opt}$ es la variación del grado de saturación del suelo.

El factor de ajuste ambiental puede ser calculado de manera independiente en función del suelo y los factores ambientales, y no se requiere conocer el valor del módulo de resiliencia en condiciones óptimas.

2.3 Aplicación de la metodología propuesta

Para explorar la aplicación de la metodología propuesta, realizamos un caso de estudio a partir de los datos de la base de datos del Sistema de Información Climática para el Diseño de Carreteras (SICliC).

Se seleccionaron 6 regiones del país para estimar el TMI y su factor ambiental, primero con base en datos climáticos históricos y posteriormente utilizando las proyecciones futuras climáticas de acuerdo a las diferentes trayectorias socio-económicas (SSP).

2.3.1 Ubicación del sitio

Los lugares de los casos de estudio se han elegido en todo México, abarcando las regiones Noroeste, Noreste, Oeste, Centro, Sur, Sur y Sursureste. Los lugares de estudio se incluyen en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Información de los sitios de los casos de estudio

Estado	ID de la Estación Meteorológica	Número de ruta	Latitud	Longitud	Altitud (m)
Sonora	26316	15 y 16	28°53'48"	-110°49'55"	238.96
Nuevo León	19063	85 y 85D	26°39'29"	-99°59'11"	267.34
Jalisco	14074	80 y 80D	21°10'6"	-102°27'55"	1,750.95
Estado de México	15099	85 y 85D	19°45'48"	-99°2'38"	2,245.22
Oaxaca	20022	175 y 131	16°57'0"	-96°43'37"	1,502.98
Campeche	4013	261	19°45'28"	-89°50'35"	99.91

Fuente: Elaboración propia.

2.3.2 Sistema de Información Climática para el Diseño de Carreteras (SICliC)

SICliC es una plataforma con base en un visualizador Web, mediante el cual los diseñadores/calculistas de carreteras pueden encontrar información y datos de las

diferentes variables meteorológicas y climáticas que se requieren para el diseño de carreteras, específicamente para activos tales como pavimentos, obras de drenaje, selección de materiales, por ejemplo, el tipo de asfalto, calcular el Índice de Humedad de Thornthwaite (TMI), etc. (Mendoza *et al*, 2021).

A través de SICliC el diseñador de una carretera podrá ubicar la estación meteorológica más cerca de su proyecto, y de ella obtener información meteorológica y climatológica histórica, así como utilizar los escenarios climáticos para México de acuerdo con los diferentes escenarios climáticos. La Figura 2.3 muestra la arquitectura del sistema



Figure 2.3 Arquitectura del SICliC [15]

Fuente: Elaboración propia, basada en Mendoza *et al*, 2021.

La arquitectura del SICliC, está integrado por 3 secciones principales y varias subsecciones, con diversas capas de información. La primera de ellas muestra la información meteorológica y los análisis climáticos sobre el clima histórico, la cual está basada en los datos de estaciones meteorológicas automáticas del país, que se encuentran a una distancia no mayor a 5 kilómetros de una carretera. La segunda sección está compuesta por los escenarios climáticos desarrollados en el país, los cuales estarán disponibles para que el diseñador de carreteras considere los cambios esperados sobre el clima en el futuro

El SICliC tiene cargadas 4,947 estaciones meteorológicas (véase Figure 2.4), donde se puede consultar información climática y hacer el uso de módulos para obtener gráficos climáticos, seleccionar el grado PG del asfalto o calcular el TMI con base en datos histórico, en este último se pueden adicionar los cambios proyectados mensuales de temperatura y precipitación de acuerdo con el escenario climático seleccionado.



Figure 2.4 Visualizador Web del SICliC

Fuente: Imagen extraída de <http://siclic.imt.mx/SICLIC/> (Consultada 27/agosto/2024).

SICliC es una plataforma dinámica que se actualiza conforme se genera más información meteorológica, así como una actualización de escenarios futuros sobre el clima. Para visitar el sitio utilice la liga: <http://siclic.imt.mx/SICLIC/>. Dependiendo del tipo de estación, se pueden consultar, temperatura (máxima, media y mínima), precipitación (máxima y promedio), radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento (máxima y promedio) y la presión atmosférica. Esta base de datos cuenta con información de 1990 a la fecha.

2.3.3 Datos climáticos de las estaciones meteorológicas

El diseñador del pavimento podrá consultar la información climática de las diferentes variables seleccionando la estación más cercana al sitio de proyecto. Al seleccionar una estación se identifican los datos generales (operador, nombre, latitud y longitud) y se puede además identificar las carreteras más cercanas.

Mediante la herramienta SICliC se obtuvo la información histórica de temperatura media mensual y la precipitación mensual registrada en cada estación meteorológica como se ilustra en la Figura 2.5, y cuyos datos se muestran en la Tabla 2.2 y Tabla 2.3.

El periodo de análisis es variable, pero con un rango de entre 10 y 30 años, sujeta a la disponibilidad de información y las actualizaciones correspondientes.

La información también puede ser visualizada de manera interactiva a través de diagramas climáticos, y además observar el cálculo automático de valores promedio, máximo y mínimo las diferentes variables climáticas.



Figura 2.5 Selección de la estación del SICliC

Fuente: Elaboración propia, basada en SICliC.

Tabla 2.2 Temperatura media mensual de los casos de estudio

ID	Temperatura media mensual (°C)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
26316	15.82	18.18	21.13	23.14	25.3	31.8	31.48	31.35	29.38	25.88	20.28	15.55
19063	14.88	16.48	20.07	23.83	27.16	29.42	30.2	30.14	27.19	23.55	18.08	14.23
14074	13.11	15.22	17.14	19.82	22.22	22.78	20.99	20.31	19.36	17.59	15.26	13.33
15099	12.45	14.35	16.72	19.2	19.8	19.59	18.8	18.78	18.45	16.58	14.62	13.32
20022	17.79	18.67	20.11	21.71	21.61	20.4	19.72	19.69	19.49	19.44	18.62	17.33
4013	22.39	23.87	25.4	27.37	28.14	27.04	26.98	26.85	26.29	25.43	23.85	22.78

Tabla 2.3 Precipitación mensual de los casos de estudio

ID	Precipitación mensual (cm)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
26316	1.44	1.76	1.14	0.47	0.00	1.96	8.04	9.38	6.12	0.70	0.16	1.25
19063	1.94	1.80	2.29	3.41	5.53	4.16	5.58	4.23	11.38	3.93	2.05	3.53
14074	1.61	0.21	0.25	0.89	1.50	12.71	19.72	17.04	10.95	3.92	0.86	0.33
15099	0.62	1.11	1.56	3.14	5.64	9.42	11.17	10.24	11.63	5.74	1.61	0.42
20022	0.06	0.35	0.66	1.59	4.28	8.30	6.66	9.40	7.82	4.30	0.52	0.52
4013	3.14	1.92	2.83	5.03	9.06	18.22	12.24	17.91	22.79	11.57	5.18	2.52

2.3.4 Determinación del Índice de Humedad Thornthwaite

Para la determinación del Índice de Humedad Thornthwaite se aplica el procedimiento indicado en la sección 2.2.3.

De manera práctica se puede utilizar el módulo diseñado para esta investigación en la plataforma SICliC, donde se puede calcular directamente el TMI utilizando los registros históricos de temperatura y precipitación. Los resultados del cálculo del TMI se muestran en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Índice de humedad de Thornthwaite mensual

ID	TMI											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
26316	-27.07	-31.58	-52.74	-61.07	-65.00	-58.82	-39.74	-35.15	-40.41	-61.00	-63.04	-30.34
19063	-12.87	-24.81	-38.41	-39.65	-37.43	-47.85	-44.30	-49.24	-6.53	-35.76	-32.02	42.66
14074	-32.60	-61.49	-61.94	-56.49	-53.72	29.04	99.59	86.33	44.88	-19.47	-51.49	-58.49
15099	-52.81	-46.02	-46.54	-34.66	-14.93	23.09	43.39	34.59	55.42	4.15	-40.20	-57.59
20022	-64.25	-60.65	-58.74	-51.63	-29.82	14.41	1.10	28.64	17.20	-21.00	-59.01	-58.21
4013	-34.95	-48.61	-47.38	-39.91	-25.25	29.65	-2.96	27.27	65.34	6.71	-23.71	-42.29

2.3.5 Determinación del Índice de Humedad Thornthwaite considerando el cambio climático

Para incorporar las variaciones del cambio climático proyectados para el sitio de proyecto se requiere conocer los factores de ajuste estimados en función de un determinado escenario, los cuales son producto de los modelos globales de circulación que se utilizan para construir proyecciones futuras del cambio climático. Los escenarios se encuentran cargados en la plataforma SICliC, por lo que solo se requiere seleccionar el factor climático, el escenario del cambio climático deseado y con base en ello obtener los cambios mensuales de la temperatura y la precipitación.

La Figura 2.6 muestra la pantalla del SICliC donde se presenta el mapa de proyección de la precipitación promedio y una secuencia de pasos para su uso. Esta secuencia se puede hacer para cada escenario del cambio y variable climática deseada.

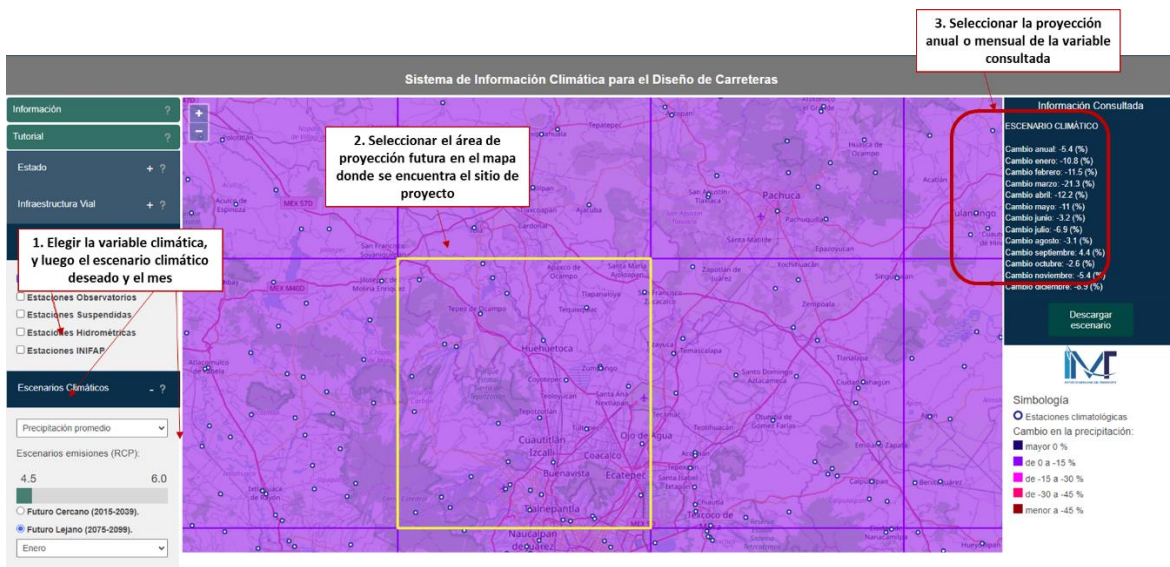


Figura 2.6 Selección de escenarios del cambio climático para el sitio de proyectos mediante el SICliC – Ejemplo SSP 4.5

Fuente: Elaboración propia, basada en SICliC.

Los cambios futuros para la precipitación y la temperatura para el sitio de proyecto que se obtienen con las coordenadas geoespaciales son adicionados a los datos históricos registrados en el sitio y con ellos determinar el Índice de Humedad Thornthwaite considerando el cambio climático.

La Tabla 2.5 muestra el TMI estimado para el escenario SSP-4.5, la Tabla 2.6 para el escenario SSP-7 y la Tabla 2.7 para el escenario 8.5.

Tabla 2.5 Índice de humedad de Thornthwaite mensual, SSP-4.5

W.S. ID	TMI											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
26316	-26.75	-35.63	-56.68	-62.68	-63.75	-62.57	-42.38	-38.85	-45.45	-55.26	-49.90	-0.75
19063	5.54	-24.17	-47.63	-40.53	-41.09	-47.27	-43.28	-44.97	-17.26	-28.24	-41.12	-6.79
14074	-38.92	-49.86	-61.30	-60.57	-48.20	24.74	90.17	57.69	35.00	-15.88	-53.52	-53.37
15099	-51.15	-50.52	-52.27	-40.77	-22.50	28.61	44.23	37.47	31.64	2.74	-47.88	-57.12
20022	-62.45	-56.82	-56.06	-38.26	-11.59	47.41	12.63	20.56	35.66	-14.62	-54.05	-60.48
4013	-37.86	-42.55	-49.31	-45.29	-28.36	10.36	-9.73	8.56	36.37	22.22	-16.72	-37.46

Tabla 2.6 Índice de humedad de Thornthwaite mensual, SSP-7.0

W.S. ID	TMI											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
26316	-21.83	-32.39	-57.50	-62.43	-63.80	-62.36	-39.96	-38.07	-44.52	-56.25	-50.42	2.13
19063	6.15	-19.90	-47.43	-41.19	-41.55	-46.26	-44.49	-43.56	-15.72	-29.83	-42.00	-1.94
14074	-39.12	-48.07	-61.60	-60.72	-48.02	25.66	89.97	55.28	41.36	-19.00	-53.22	-51.92
15099	-51.88	-49.65	-52.94	-39.22	-24.04	30.21	43.09	35.44	37.64	-0.80	-47.61	-57.26
20022	-62.66	-56.76	-56.39	-38.89	-8.30	47.12	10.67	17.21	36.46	-18.88	-54.30	-60.41
4013	-47.86	-36.86	-44.45	-40.36	-21.85	1.22	-15.20	11.14	33.62	17.63	-19.22	-36.19

Tabla 2.7 Índice de humedad de Thornthwaite mensual, SSP-8.5

W.S. ID	TMI											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
26316	-31.24	-37.30	-57.48	-62.78	-63.91	-62.52	-42.12	-38.29	-45.18	-55.36	-48.20	-4.24
19063	-7.67	-25.13	-48.53	-41.72	-41.94	-47.39	-42.36	-44.60	-19.11	-32.34	-39.92	-9.15
14074	-48.08	-50.98	-61.82	-60.85	-48.43	23.80	87.39	55.63	32.83	-17.21	-53.20	-53.35
15099	-55.33	-52.36	-52.56	-40.32	-23.92	26.88	41.51	36.08	31.28	0.31	-47.53	-57.35
20022	-63.11	-57.04	-56.88	-38.69	-10.97	43.95	10.09	14.05	34.79	-13.97	-54.48	-60.64
4013	-42.43	-43.48	-49.92	-46.32	-28.12	8.28	-14.08	2.79	43.19	21.62	-19.29	-36.18

En general las proyecciones indican una disminución de la precipitación y aumentos de la temperatura, que impactan en la predicción del TMI, debido a los aumentos en la succión del suelo.

La Figura 2.7 muestra la variación del TMI para la región Noroeste del país, con base en los datos de la estación meteorológica No. 26316, donde se observa que de acuerdo con las proyecciones del cambio climático habrá una disminución del TMI, el cual continúa disminuyendo conforme el escenario climático es más severo.

Es importante destacar que aún existe incertidumbre sobre las proyecciones del cambio climático, porque lo que habrá que tener cuidado en el manejo e interpretación de los resultados.

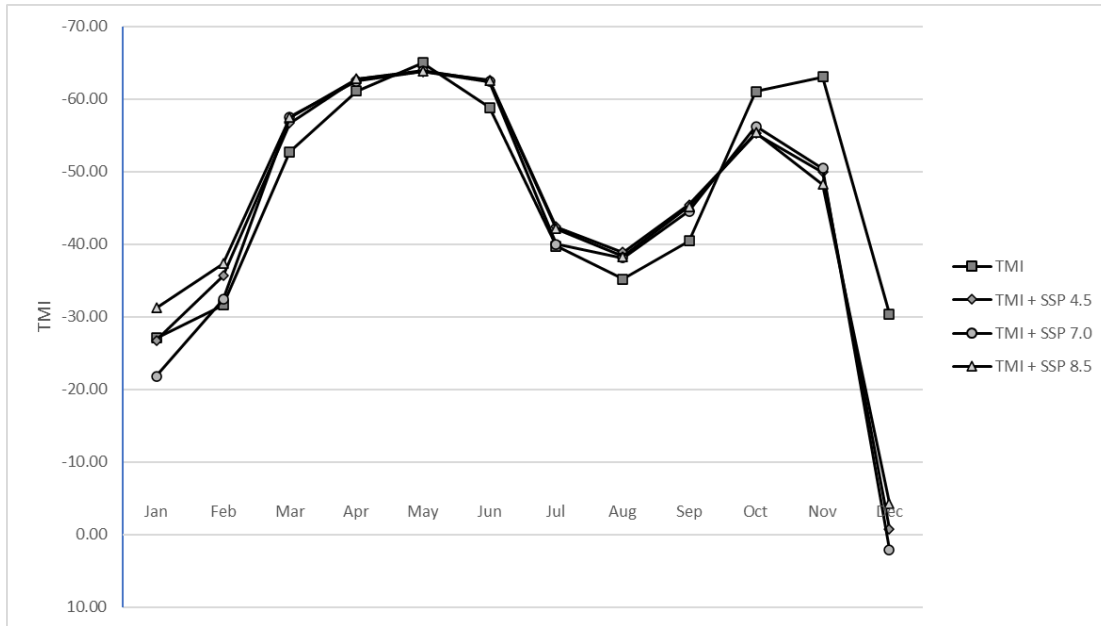


Figura 2.7 Variación del TMI en función de los diferentes escenarios SSP – Caso de estudio “Región Noroeste”

Fuente: Elaboración propia.

2.3.6 Determinación del Factor Ambiental

Para la estimación del factor ambiental se utilizó el modelo utilizado en el EICM, el cual se determina mediante la Ecuación 2.6. Los resultados se presentan en la Tabla 2.8 con base en datos históricos y en las Tabla 2.9, 2.10 y 2.11 incorporando el cambio climático para cada escenario SSP utilizado.

Tabla 2.8 Factor ambiental – Datos históricos

W.S. ID	Factor ambiental - EICM											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
26316	1.62	1.65	1.76	1.81	1.83	1.80	1.69	1.67	1.69	1.81	1.82	1.64
19063	1.55	1.61	1.68	1.69	1.68	1.74	1.72	1.74	1.51	1.67	1.65	1.28
14074	1.65	1.81	1.82	1.79	1.77	1.34	1.04	1.09	1.27	1.58	1.76	1.80
15099	1.76	1.73	1.73	1.66	1.56	1.37	1.27	1.31	1.22	1.46	1.69	1.79
20022	1.83	1.81	1.80	1.76	1.64	1.41	1.48	1.34	1.40	1.59	1.80	1.80
4013	1.66	1.74	1.73	1.69	1.61	1.34	1.50	1.35	1.18	1.45	1.60	1.70

Table 2.9 Factor ambiental – Escenario del cambio climático SSP-4.5

W.S. ID	Factor ambiental - EICM											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
26316	1.70	1.70	1.77	1.82	1.83	1.82	1.76	1.73	1.76	1.82	1.83	1.69
19063	1.60	1.66	1.73	1.75	1.74	1.78	1.76	1.79	1.60	1.72	1.68	1.35
14074	1.70	1.82	1.82	1.80	1.79	1.43	1.14	1.19	1.30	1.63	1.78	1.81
15099	1.78	1.75	1.76	1.71	1.62	1.44	1.37	1.38	1.26	1.51	1.71	1.80
20022	1.83	1.82	1.81	1.78	1.68	1.48	1.57	1.42	1.44	1.61	1.81	1.80
4013	1.70	1.76	1.78	1.76	1.68	1.51	1.63	1.52	1.33	1.52	1.65	1.72

Table 2.10 Factor ambiental – Escenario del cambio climático SSP-7.0

W.S. ID	Factor ambiental - EICM											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
26316	1.59	1.65	1.79	1.82	1.83	1.82	1.69	1.68	1.72	1.78	1.75	1.47
19063	1.45	1.58	1.73	1.70	1.70	1.73	1.72	1.71	1.56	1.64	1.70	1.49
14074	1.69	1.74	1.81	1.81	1.74	1.36	1.08	1.22	1.28	1.58	1.77	1.76
15099	1.76	1.75	1.76	1.69	1.61	1.33	1.27	1.31	1.30	1.48	1.73	1.79
20022	1.82	1.79	1.78	1.69	1.52	1.26	1.43	1.40	1.31	1.58	1.77	1.81
4013	1.74	1.67	1.72	1.69	1.59	1.47	1.56	1.43	1.32	1.39	1.58	1.67

Table 2.11 Factor ambiental – Escenario del cambio climático SSP-8.5

W.S. ID	Factor ambiental - EICM											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
26316	1.64	1.68	1.79	1.82	1.83	1.82	1.70	1.68	1.72	1.78	1.74	1.50
19063	1.52	1.61	1.74	1.70	1.70	1.73	1.71	1.72	1.58	1.65	1.69	1.53
14074	1.74	1.75	1.82	1.81	1.74	1.36	1.09	1.22	1.32	1.57	1.77	1.77
15099	1.78	1.76	1.76	1.69	1.60	1.35	1.28	1.31	1.33	1.48	1.73	1.79
20022	1.82	1.79	1.79	1.68	1.54	1.27	1.43	1.41	1.31	1.55	1.77	1.81
4013	1.71	1.71	1.75	1.73	1.63	1.44	1.55	1.47	1.27	1.37	1.58	1.67

Los sitios de estudio registran poca precipitación durante el año, y con las proyecciones del cambio climático, se espera una disminución de la precipitación, por lo que el clima del sitio se vuelve semiárido o árido de acuerdo con los resultados del TMI, y por lo tanto el factor ambiental refleja valores positivos que incrementarán los módulos de resiliencia del sitio de proyecto.

La Figura 2.8 muestra la variación del factor ambiental para la región Noroeste del país, donde se observa que de acuerdo con las proyecciones del cambio climático habrá un incremento de este factor, debido a menores cambios en el contenido de humedad del suelo.

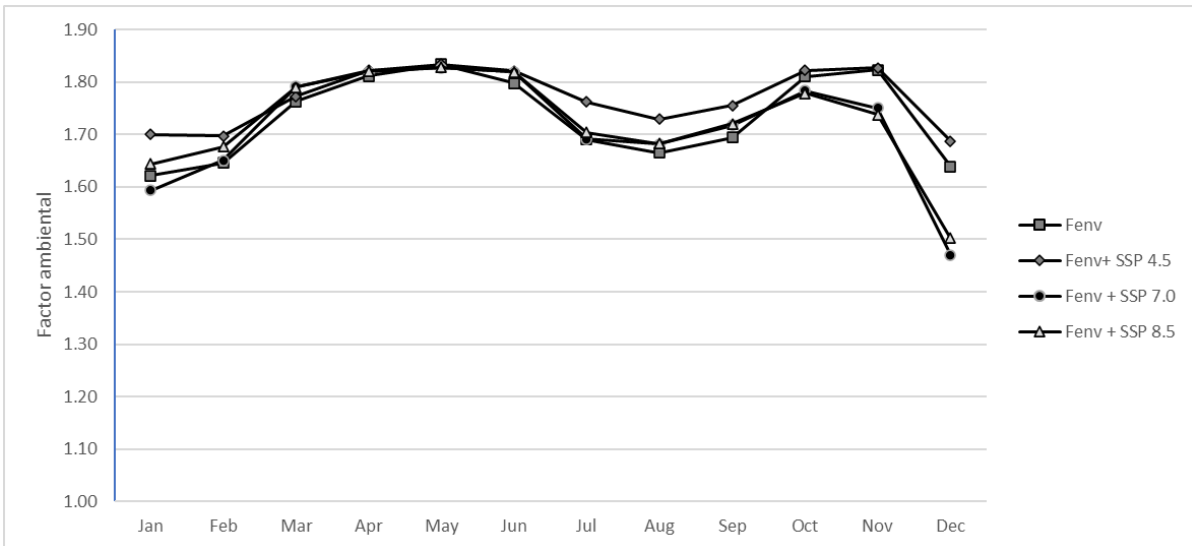


Figura 2.8 Variación del factor ambiental en función de los diferentes escenarios SSP – Caso de estudio “Región Noroeste”

2.4 Uso potencial de la información para el diseño de pavimentos

La caracterización medioambiental del sitio en donde se diseñe un pavimento es muy importante para garantizar un desempeño adecuado del pavimento y evitar fallas durante su periodo de diseño.

Los resultados de la propuesta para incorporar el cambio climático reflejan que, para el suelo del sitio del caso de estudio, el módulo en equilibrio al ser afectado por el factor ambiental, este incrementará en cada uno de los escenarios SSP utilizados, lo cual tiene un beneficio para definir la estructura de las capas de pavimento.

El MEPDG utiliza la variación temporal de la humedad y la temperatura en todos los niveles de análisis, a través del factor ambiental (F_{env}).

El EICM trabaja con los factores ambientales de temperatura y precipitación, y predice la humedad y la succión del suelo en función del tiempo, para cualquier localización para materiales de capas granulares.

El módulo de resiliencia en equilibrio (M_{R-eq}) para cualquier localización y temporada puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$M_{R-eq} = F_{env} * M_{R-opt} \quad (2.7)$$

Los resultados que se obtengan con la Ecuación (7), permitirán evaluar como el módulo de resiliencia óptimo se modifica mensualmente, el cual está influenciado por la precipitación mensual y la temperatura media de cada mes.

Estos valores de módulo de resiliencia en equilibrio para el suelo de subrasantes o cimentación o capas granulares para un pavimento carretero pueden ser utilizados en el diseño de pavimentos, ya sea mediante métodos empíricos o métodos mecánico-empíricos.

La principal ventaja de contar con estos valores es que consideran el clima del sitio y si se desea, se puede considerar el cambio climático, con la finalidad de construir pavimentos más resilientes.

3. Desarrollo de una herramienta para considerar el clima y el cambio climático en el módulo de resiliencia de la subrasante en pavimentos carreteros

En las últimas décadas, las condiciones climáticas de México y en el mundo han cambiado considerablemente (IPCC, 2023), y esto se ha visto reflejado en diversos impactos en los pavimentos carreteros, ya sea en daños directos debido al clima extremo o en la reducción de su vida útil por influencia del clima y su variación (TRL, 2008; NASEM, 2014).

Como se ha manifestado en la presente investigación, las condiciones medioambientales tienen un impacto significativo en el desempeño y durabilidad de los pavimentos.

Las condiciones climáticas representan variables importantes en el comportamiento de las propiedades de los materiales de los pavimentos, los cuales afectan la respuesta y desempeño del pavimento (Meagher, 2012). Por lo tanto, los factores ambientales y su variación son elementos fundamentales que deben considerarse en el diseño de pavimentos.

Para evaluar el efecto del clima en los pavimentos, algunas investigaciones evaluaron las correlaciones entre las propiedades estructurales del pavimento (representadas por los módulos elásticos de las capas), los factores climáticos (representados por las condiciones de temperatura y humedad del pavimento) y el comportamiento de las propiedades de los materiales. Los resultados evidenciaron una estrecha correlación entre el clima y los módulos de las capas del pavimento (Meagher *et al*, 2012; Ali & Lopez, 1996; Ackah *et al*, 2021; Teltayev & Suppes, 2019).

El módulo de resiliencia (M_R) es una propiedad de los materiales significativa y racional que debe ser incluida en el proceso de diseño de un pavimento (Elliot & Thornton, 1988).

Las capas de materiales granulares (base, subbase, subrasante o suelo de cimentación) están determinadas por el módulo de resiliencia, el cual es un parámetro importante que además de representar propiedades mecánicas, permite considerar variaciones climáticas por los cambios en el contenido de agua y la succión del suelo.

En los últimos años, ha aumentado el interés por determinar la influencia de los cambios de humedad en el módulo de resiliencia de los suelos de subrasante bajo estructuras de pavimento (Naji, 2016). Esta variación climática y como ha sido estudiada e incorporada en el módulo de resiliencia en los métodos de diseño empíricos y mecánico-empíricos es estudiada en la presente investigación.

Con base en diversas investigaciones se desarrolló un procedimiento para la estimación del módulo de resiliencia considerando el clima y el cambio climático a través de propiedades del suelo, el uso del Sistema de Información Climática para el Diseño de Carreteras (SICliC) y el Modelo Climático Integrado Mejorado (EICM) del MEPDG de AASHTO, y una herramienta práctica mediante el cual se puede estimar el Índice de Humedad Thornthwaite (TMI) con base en datos históricos de precipitación y temperatura, y utilizando escenarios del cambio climático para México, que se describió en el capítulo 2.

La herramienta desarrollada permite determinar predecir el comportamiento de variables que influyen el módulo de resiliencia y que están asociadas al clima, tales como el contenido de humedad, la matriz de succión y el grado de saturación, mediante los cuales se puede estimar un factor ambiental para materiales granulares. Este factor permite ajustar el módulo de resiliencia óptimo en un módulo de resiliencia en equilibrio.

3.1 El módulo de resiliencia en el diseño de pavimentos

El módulo de resiliencia (M_R), de acuerdo con Seed *et al*, se define como la relación entre el esfuerzo desviador repetido (σ_d) y la deformación axial recuperable (ϵ_r) en un ensayo triaxial cíclico (Seed *et al*, 1962).

A partir de la introducción del concepto de módulo de resiliencia, diversas investigaciones y protocolos de prueba se han realizado para predecir o determinar este importante parámetro dentro del diseño estructural de pavimentos.

3.1.1 Factores que influyen en el comportamiento del módulo de resiliencia

El módulo de resiliencia no es un factor único, ni tampoco un factor con un valor constante, por lo tanto, esta propiedad del suelo se encuentra sujeta a diversos factores que alteran su desempeño.

- El módulo de resiliencia varía en función de la aplicación de esfuerzos (magnitud y duración (Seed & Chan, 1964; Seed *et al*, 1967a; Hveem *et al*, 1963).
- El efecto de la tixotropía (reestructuración de un suelo) en el módulo resiliente varía con el número de repeticiones (Seed *et al*, 1967b).
- Los valores de módulo de resiliencia decrecen rápidamente con el incremento del esfuerzo desviador (Garnica *et al*, 2001).
- El método de compactación tiene un efecto importante en el acomodo de las partículas del suelo, modificando el comportamiento del módulo de resiliencia (Yaghoubi, 2016)
- El comportamiento del módulo de resiliencia está ligado al contenido de humedad (Edil *et al* 1979; Houry & Zaman, 2004).
- Los materiales granulares, el tipo de material y sus características influyen en el comportamiento del módulo de resiliencia (Zaman *et al* 1994; Su *et al*, 2021)

3.1.2 Protocolos de prueba para determinar el módulo de resiliencia

Los métodos para estimar el módulo de resiliencia (relación esfuerzo-deformación de un material) es a través de una prueba de compresión triaxial, pero aplicando un esfuerzo cíclico dinámico.

El módulo de resiliencia es determinado principalmente mediante dos protocolos de prueba:

- El método de prueba T307 de la Asociación Estadounidense de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte (AASHTO, por sus siglas en inglés), permite determinar el módulo de resiliencia para el suelo de cimentación o subrasante, y para los materiales de las capas de base y sub-base (AASHTO, 2007).
- El procedimiento NCHRP 1-28, donde el módulo de resiliencia se determina mediante pruebas de compresión de carga repetidas en especímenes de prueba del material no ligado (NCHRP, 2004).

3.1.3 Modelos para determinar el módulo de resiliencia

Para evaluar la relación esfuerzo-deformación del módulo de resiliencia de materiales granulares en la subrasante (incluyendo base y subbase) se han construido diferentes modelos basados en la teoría de la elasticidad, considerando la no linealidad del esfuerzo-deformación, principalmente por la importancia de este parámetro en el comportamiento integral de la estructura de un pavimento.

El modelo planteado por Seed *et al* (1962), fue mejorado por Seed *et al* (1967) para introducir el esfuerzo volumétrico como una variable dentro del modelo para predecir el módulo de resiliencia. Hicks & Monismith (1971), evaluaron factores que influyen en la respuesta resiliente de los materiales no granulares (presión de confinamiento, grado de saturación, densidad seca, contenido de finos), obteniendo como resultado dos ecuaciones predictivas (Hicks & Monismith, 1971).

Moossazadeh & Witczak (1981) desarrollaron un modelo simple para representar el comportamiento no lineal del suelo granular de la subrasante, este provee una base rápida para determinar un único valor del módulo, el cual puede ser usado en los gráficos para el diseño de pavimentos de los métodos Shell, Instituto del Asfalto, inclusive en el método AASHTO. Smith & Witczak (1981) desarrollaron una técnica sencilla, pero precisa, para determinar el módulo equivalente de una capa para el material granular suelto en un pavimento flexible de carretera que tiene en cuenta el comportamiento no lineal del material granular.

El estudio realizado por Uzan (1985), sugiere incluir el esfuerzo volumétrico en la ecuación predictiva del módulo de resiliencia. Los resultados de las pruebas realizadas demostraron que los valores medidos y los obtenidos del modelo predictivo son bastante buenos. Witczak & Uzan (1988) propusieron una mejora al modelo de Uzan (1985), el cual fue adoptado para su incorporación en la metodología mecánico-empírica para el diseño de pavimentos por AASHTO desde

su primera versión en 2008 (AASHTO, 2008), la cual es representada por la siguiente ecuación:

$$M_R = k_1 * p_a * \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{k_3} \quad (3.1)$$

Donde, M_R es el módulo de resiliencia, p_a es la presión atmosférica, k_1 , k_2 y k_3 son constantes de regresión adimensionales, θ es el esfuerzo volumétrico, y τ_{oct} es el esfuerzo ortogonal.

3.1.4 Utilización del módulo de resiliencia en el diseño de pavimentos

En el diseño de pavimentos el M_R es una propiedad que se utiliza para caracterizar los materiales granulares que conforman las capas de bases, sub-base y subrasante. Es una medida de la rigidez del material y proporciona un medio para analizar la rigidez de los materiales en diferentes condiciones, como la humedad, la densidad y el nivel de esfuerzos.

En México, es utilizado en el diseño empírico de pavimentos AASHTO (1993) y mecánico-empírico de pavimentos MEPDG de AASHTO (2008).

En el método AASHTO (1993), considera el módulo de resiliencia de cada capa de materiales granulares, y de manera particular del suelo de cimentación o subrasante donde además estima un módulo de resiliencia efectivo en función de la variación estacional de la capacidad de soporte del terreno natural (a través del módulo de resiliencia). Los espesores de cada capa son determinados a través del número estructural (SN), para que el pavimento flexible pueda soportar el nivel de carga solicitado por el tránsito, en donde es considerado el módulo de resiliencia. Para los pavimentos rígidos, el módulo de resiliencia del suelo de subrasante es utilizado para determinar el módulo de reacción de la subrasante (k), conjuntamente con el módulo de resiliencia de la base.

El modelo general utilizado para determinar el módulo de resiliencia en el MEPDG-AASHTO es a través de la Ecuación (3.1), donde se determina esta propiedad conforme la caracterización de los materiales y del clima del sitio del proyecto. El valor de M_R es utilizado para determinar la deformación permanente dentro del proceso de cálculo en el diseño MEPDG.

En general, los métodos de diseño de pavimentos con enfoque empírico consideran la capacidad de carga del suelo de cimentación o subrasante, cuya propiedad puede ser medida por diferentes métodos y correlacionarse para obtener el módulo de resiliencia, en cualquier caso, este módulo será afectado por el factor ambiental que se determinará más adelante, y por lo tanto incluir el clima del sitio del proyecto.

3.2 Incorporación del clima en el módulo de resiliencia para el diseño de pavimentos

Los factores ambientales de una forma u otra influyen en el comportamiento del módulo de resiliencia, y estos varían estacionalmente. Los diseñadores de

pavimentos deben evaluar cómo esta variación climática puede influir en el comportamiento de la subrasante (Elliott & Thornton, 1988).

La mayor variación del módulo de resiliencia de un suelo de cimentación o de la subrasante se atribuye a los cambios estacionales de humedad (Elliott & Thornton, 1988). Estos cambios se presentan después de la construcción del pavimento, donde las fluctuaciones estacionales de las condiciones normales de humedad se deben a la infiltración de lluvia y a la variación del agua subterránea (NASEM, 2008). Los suelos propensos a cambios de volumen debido a cambios en el contenido de agua son, por naturaleza, no saturados; y sus condiciones de estado de esfuerzos son diferentes de aquellos suelos que están saturados (Zapata *et al*, 2019).

3.2.1 Incorporación del clima en el MEPDG-AASHTO

El enfoque para el diseño de pavimentos, denominado mecanicista-empírico (MEPDG, por sus siglas en inglés de Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide), permite incorporar en la etapa 1, datos de entrada sobre el clima y el medio ambiente, los materiales y las características del tránsito.

El MEPDG a través del modelo denominado Modelo Climático Integrado Mejorado (EICM, por sus siglas en inglés de *Enhanced Integrated Climatic Model*), el cual permite considerar las fluctuaciones estacionales en los perfiles de humedad y temperatura en la estructura del pavimento, como resultado de los cambios en el nivel freático, la precipitación/infiltración, los ciclos de hielo-deshielo y otros factores externos (Zapata *et al*, 2007).

La guía propone para determinar el módulo de resiliencia el uso de la Ecuación (3.1) o la determinación de esta propiedad en laboratorio mediante el uso de protocolos de prueba como los descritos en la sección 3.1.2 y se le denomina “Módulo de Resiliencia Óptimo”. Este módulo debe ser afectado por el factor ambiental que se obtiene del modelo ambiental implementado dentro del EICM, para calcular el “Módulo de Resiliencia en Equilibrio” el cual considera estacionalmente las variaciones de humedad y temperatura, tal y como se observa en la Figura 1.10.

3.2.2 El Índice de Humedad Thornthwaite en el diseño de pavimentos

Para incorporar los cambios de humedad en la subrasante de los pavimentos en el MEPDG se introdujeron los siguientes hallazgos dentro del EICM, primero determinando la matriz de succión a través del TMI y posteriormente determinaron el grado de saturación del suelo. Los valores que se introdujeron en el modelo climático del EICM como parámetros que describen el tipo de suelo son P_{200} y wPI .

Perera (2003), desarrolló correlaciones para dos modelos: el modelo $TMI - P_{200}$, válido para materiales de base granular; y el modelo $TMI - P_{200}/wPI$, utilizado para estimar la succión de equilibrio de materiales de subbase y subrasante. Estos modelos se utilizan para hallar la succión de equilibrio del suelo en función de todos los aspectos que afectan al contenido de agua, como las condiciones climáticas (representadas por el TMI). Las ecuaciones se muestran en la sección 3.3.6.

3.3 Descripción de la herramienta para la determinación del módulo de resiliencia considerando el clima y el cambio climático en el sitio de proyecto

La propuesta se centra el uso del Modelo Climático Integrado Mejorado (EICM, por sus siglas en inglés de *Enhanced Integrated Climatic Model*), del enfoque para el diseño de pavimentos, denominado mecanicista-empírico (MEPDG, por sus siglas en inglés de *Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide*), adaptado para que pueda ser utilizado en México, el cual permite considerar las fluctuaciones estacionales en los perfiles de humedad basados en los datos meteorológicos (precipitación y temperatura) del sitio en estudio. La Figura 3.1 muestra el diagrama de flujo adaptado en una secuencia de 12 pasos.

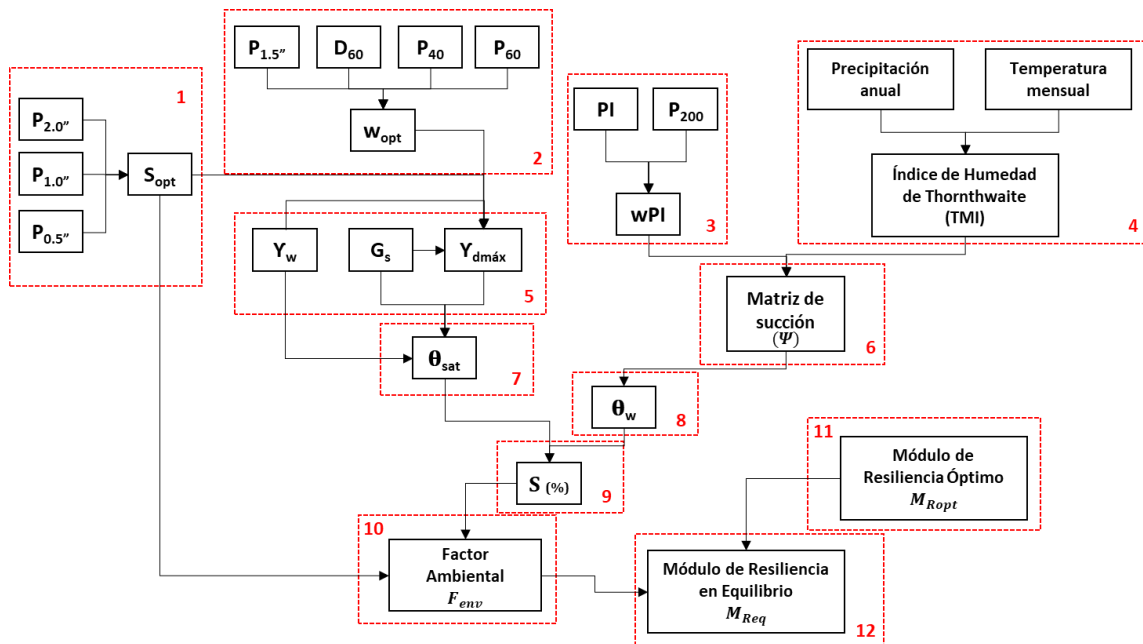


Figure 3.1 Diagrama de flujo de la propuesta metodológica para estimar el módulo de resiliencia considerando el clima y el cambio climático

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1 Grado de Saturación Óptima

El modelo de compactación del EICM para estimar el grado de saturación óptima (S_{opt}) correlaciona el porcentaje que pasa la llama #200 (P_{200}) y el Índice de Plasticidad (PI) [37]. El cálculo se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$S_{opt} = 6.752(P_{200} * PI)^{0.147} + 78 \quad (3.2)$$

Donde, P_{200} es el porcentaje que pasa la malla, PI es el índice de plasticidad (%), que se obtiene de $PI = LL - PL$; donde, LL es el límite líquido (%) y PL es el límite plástico (%).

3.3.2 Contenido de Humedad Óptimo

El modelo de compactación del EICM para estimar el contenido de humedad óptimo (W_{opt}) correlaciona el porcentaje que pasa la malla #200 (P_{200}), el diámetro (mm) del 60% del material (D_{60}) y el Índice de Plasticidad (PI) (NASEM, 2008). El cálculo se realiza mediante la siguiente ecuación:

- Si $P_{200} * PI > 0$ (suelos con plasticidad)

$$W_{opt} = 1.3(P_{200} * PI)^{0.73} + 11 \quad (3.3)$$

- Si $P_{200} * PI = 0$ (suelos sin plasticidad y materiales granulares)

$$W_{opt(T99)} = 8.6425(D_{60})^{-0.1038} \quad (3.4)$$

3.3.3 Índice de plasticidad ponderado

El índice de plasticidad ponderado, wPI , es obtenido a través de la ecuación:

$$wPI = \left(\frac{P_{200}}{100}\right) PI \quad (3.5)$$

3.3.4 Índice de Humedad Thornthwaite

El índice de humedad de Thornthwaite, TMI, es un parámetro que se obtiene a partir de datos climáticos, normalmente recogidos en estaciones meteorológicas.

El procedimiento de cálculo está descrito en la sección 2.2.3, utilizando datos históricos y datos considerando el cambio climático como se propone en la presente investigación descritos en la sección 2.2.

3.3.5 Gravedad específica del suelo

La gravedad específica del suelo se pueden obtener mediante la norma ASTM D854 mediante ensayos de laboratorio o mediante el modelo G_s del EICM, este parámetro es importante para el diseño apropiado de capa de material granular del pavimento (Houston et al, 2006). La ecuación del modelo G_s está definido por la siguiente ecuación:

$$G_s = 0.041(wPI)^{0.29} + 2.65 \quad (3.6)$$

Donde, wPI es el índice plasticidad ponderado

3.3.6 Matriz de succión

La succión en la superficie del suelo a lo largo del tiempo puede ser modelado mediante los valores mensuales del TMI que se obtienen de registros históricos. La relación entre contenido de humedad en sitio, la succión, y un indicador de las propiedades del suelo estudiada por Perera (2023) permitió construir dos modelos.

Para la subrasante se desarrolló un modelo de predicción de humedad prospectivo. Para ello se definió utilizar el porcentaje que pasa por la malla (tamiz) número 200 (P_{200}) y el índice de plasticidad del suelo (PI), los cuales son necesarios para describir los suelos plásticos. Por lo tanto, se añadió el parámetro wPI además del parámetro P_{200} .

El modelo $TMI - P_{200}/wPI$ es de interés para la esta herramienta. Este modelo fue desarrollado para materiales de grano fino, lo que lo hace adecuado para suelos expansivos, y es representando mediante la siguiente ecuación:

$$\psi = \alpha \left[e^{\left(\frac{\beta}{TMI+\gamma}\right)} + \delta \right] \quad (3.7)$$

Donde, ψ es la matriz de succión del suelo y α, β, γ y δ son constantes de regresión

Rosenbalm (2011), desarrolló ecuaciones para cada constante de regresión. Estas ecuaciones se pueden utilizar de acuerdo con el valor del wPI .

- Para $wPI < 0.5$ las ecuaciones con las siguientes:

$$\beta = 2.56075(P_{200}) + 393.4625$$

$$\gamma = 0.09625(P_{200}) + 132.4875$$

$$\delta = 0.025(P_{200}) + 14.75$$

- Para $wPI \geq 0.5$ las ecuaciones con las siguientes:

$$\beta = 0.006236(wPI)^3 - 0.7798334(wPI)^2 + 36.786486(wPI) + 501.9512$$

$$\gamma = 0.00395(wPI)^3 - 0.04042(wPI)^2 + 1.454066(wPI) + 136.4775$$

$$\delta = -0.01988(wPI)^2 + 1.27358(wPI) + 13.91244$$

3.3.7 Contenido volumétrico saturado de agua

El EICM requiere el contenido de agua volumétrica saturada o la porosidad del suelo (Rosenbalm, 2011). La ecuación del EICM siguiente permite obtener el contenido de agua volumétrica saturada:

$$\theta_{sat} = \left(1 - \frac{\gamma_d}{G_s \gamma_w}\right) \quad (3.8)$$

Donde, γ_d es la densidad seca del suelo (peso unitario seco del suelo), $\gamma_d = 0.9 \gamma_{dm\acute{a}x}$, y $\gamma_{dm\acute{a}x}$ es la densidad seca máxima (lb/ft³), la cual se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\gamma_{dm\acute{a}x} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + \frac{W_{opt} G_s}{S_{opt}}} \quad (3.9)$$

Donde, G_s es la gravedad específica del suelo, γ_w es la densidad del agua (62.4 lb/ft³ o 9.81kN/m³)

Existe una ecuación mejorada para determinar la densidad seca del suelo para materiales en sitio propuesta por Houston (2006a y 2006b), la cual se expresa a continuación:

$$\gamma_d = 0.81944\gamma_{dm\acute{a}x} + 18.485 \quad (3.10)$$

3.3.8 Contenido volumétrico de agua

El EICM automáticamente calcula los parámetros de las curvas SWCC. El modelo SWCC está dado por la ecuación de Fredlund & Xing (1994). Posteriormente los parámetros de ajuste fueron actualizados y correlacionadas con la familia de curvas obtenidas por Zapata (Zapata, 1999).

El contenido volumétrico de agua también puede obtenerse por el modelo propuesto por Houston *et al* (2006a), utilizando el Índice de Plasticidad (PI) y el porcentaje que pasa la malla #200 (P_{200}).

El modelo propone las siguientes dos ecuaciones:

$$\theta_w = 4 + 1.5P_{200}^{0.6994} + 0.03(TMI) \quad (3.11)$$

$$\theta_w = 40 + 0.11(P_{200} - 53) \quad (3.12)$$

Hay tres restricciones asociadas con esta variable:

- 1) si el P_{200} es menos del dos por ciento, use dos por ciento.
- 2) si el θ_w de la ecuación 12 es mayor que 40 por ciento, utilice la ecuación 13.
- 3) Si θ_w es mayor que θ_{sat} entonces θ_w será igual a θ_{sat} .

3.3.9 Grado de saturación

El grado de saturación requiere para su cálculo el contenido volumétrico de agua saturada y el contenido volumétrico de agua (Wickzak et al, 2006; Houston (2006a). A través de la siguiente ecuación se puede estimar el grado de saturación:

$$S(\%) = \frac{\theta_w}{\theta_{sat}} (100) \quad (3.13)$$

Donde, $S(\%)$ es el grado de saturación

3.3.10 Factor ambiental

La guía de diseño MEPDG incorpora las variaciones en el contenido de humedad directamente en la predicción del M_R utilizando un factor ambiental para materiales no ligados no congelados (F_U).

De manera particular en los documentos técnicos se utiliza como F_{env} , el cual es adecuado para materiales congelados (F_F), materiales en recuperación a su estado anterior antes de la congelación (F_R), y materiales totalmente recuperados o no congelados (F_U).

La sección 2.2.4 describe el procedimiento para su obtención a través de la Ecuación (2.6). Como se indicó anteriormente el factor de ajuste ambiental puede ser calculado de manera independiente en función del suelo y los factores ambientales, y no requiere conocer el valor del módulo de resiliencia en condiciones óptimas.

El modelo de predicción utilizado actualmente el MEPDG se muestra en la Figura 3.2.

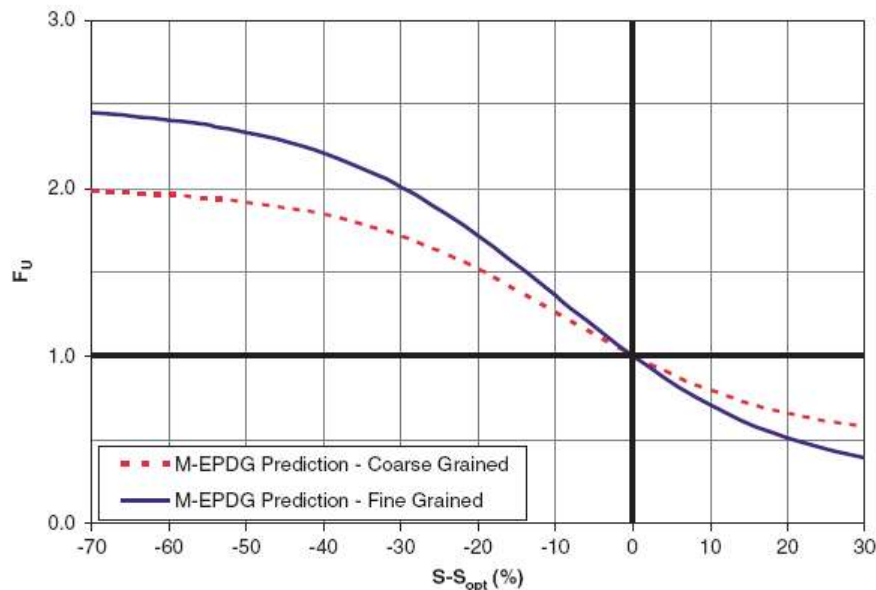


Figure 3.2 Modelo del MEPDG para predecir el factor ambiental (F_U)

Fuente: Cary *et al*, 2010.

3.3.11 Módulo de Resiliencia Óptimo

El módulo de resiliencia para suelos sueltos en su punto óptimo se puede obtener de diferentes maneras:

- Mediante ensayos de laboratorio, ya sea mediante el método de prueba T307 de la AASHTO “Determinación del módulo de resiliencia de suelos y agregados” (AASHTO, 2007), o el procedimiento NCHRP 1-28 “Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design” (NCHRP,2004).
- Utilizando correlaciones con propiedades no plásticas o plásticas del suelo, u otros ensayos como el CBR (Rosenbalm, 2011).

3. Desarrollo de una herramienta para considerar el clima y el cambio climático en el módulo de resiliencia de la subrasante en pavimentos carreteros

$$M_{R-insitu} = 2555(CBR)^{0.64} \quad (3.14)$$

$$M_{R-opt} = M_{R-insitu} [2.11 - 2.78 \times 10^{-5} M_{R-insitu}] \quad (3.15)$$

- No plásticas

$$CBR = 28.09(D_{60})^{0.58} \quad (3.16)$$

- Plásticas

$$CBR = \frac{75}{1+0.728wPI} \quad (3.17)$$

- c) Utilizando valores recomendados por AASHTO para los diferentes tipos de suelo de acuerdo con su clasificación, tales como lo que se ilustran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Valores recomendados para el módulo de resiliencia en condición óptima M_{R-opt} (psi)

Clasificación del suelo (AASHTO)	Valores para base o sub-base (pavimentos flexibles y rígidos)	Valores para terraplenes y subrasante para pavimentos flexibles	Valores para terraplenes y subrasante para pavimentos rígidos
A-1-a	40,000	29,500	18,000
A-1-b	38,000	26,500	18,000
A-2-4	32,000	24,500	16,500
A-2-5	28,000	21,500	16,000
A-2-6	26,000	21,000	16,000
A-2-7	24,000	20,500	16,000
A-3	29,000	16,500	16,000
A-4	24,000	16,500	15,000
A-5	20,000	15,500	8,000
A-6	17,000	14,500	14,000
A-7-5	12,000	13,000	10,000
A-7-6	8,000	11,500	13,000

Fuente: AASHTO, 2015.

- d) También se puede utilizar el modelo general utilizado para determinar el módulo de resiliencia en el MEPDG de AASHTO, expresado en la Ecuación (3.1).

3.3.12 Módulo de Resiliencia en Equilibrio

De acuerdo con lo descrito en la sección 2.4, el MEPDG utiliza la variación temporal de la humedad y la temperatura en todos los niveles de análisis, a través del factor ambiental (F_{env}).

El EICM trabaja con los factores ambientales de temperatura y precipitación, y predice la humedad y la succión del suelo en función del tiempo, para cualquier localización para materiales de capas granulares.

El módulo de resiliencia (M_{R-eg}) para cualquier localización y temporada puede expresarse mediante la Ecuación (2.7).

3.4 Caso de estudio

Para mostrar la aplicación de la herramienta se aplicó en un estudio de caso para un sitio de proyecto cercano al Aeropuerto Felipe Ángeles, en el Estado de México.

Para ello es importante la caracterización del suelo, obteniendo su granulometría y los Límites de Atterberg. La Tabla 2 muestra los resultados del análisis del suelo del sitio del proyecto.

Tabla 3.2 Granulometría e Índice de Plasticidad del suelo del sitio de proyecto

Variable	Tamaño (mm)	Porcentaje
P0.5	0.5	97
P1.0	1	99
P1.5	1.5	99
P2.0	2	99.75
P40	0.4	96
P60	0.25	93.5
P200	0.074	66
D60	0.06	60
IP (%) =	11	

3.4.1 Cálculo de las propiedades del suelo

Siguiendo en proceso metodológico descrito en la sección 3.3, se determinaron las propiedades del suelo y los resultados se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Resultados del cálculo de las propiedades del suelo

Parámetro	Ecuación	Resultado
Grado de saturación óptima (S_{opt})	3.2	87.036%
Contenido de Humedad Óptimo (W_{opt})	3.3	16.526%
Índice de plasticidad ponderado (wPI)	3.5	7.26
Gravedad específica del suelo (G_s)	3.6	2.72
Contenido volumétrico saturado de agua (θ_{sat})	3.8	40.67%

3.4.2 Determinación del Índice de Humedad Thornthwaite

Mediante la herramienta SICliC se localizó la estación meteorológica más cercana al sitio de proyecto, que para este ejemplo corresponde a “San Mateo Acuitlapilco” (véase la Figura 2.5), de donde se extrae y se consulta la información meteorológica del sitio.

Mediante el módulo diseñado para este proyecto en la plataforma SICliC se puede calcular directamente el TMI utilizando los registros históricos de temperatura y precipitación, desde 1991 a la fecha, es decir, se cuentan con registros para esta estación de 30 años aproximadamente, siguiendo el procedimiento descrito en la sección 2.26. Los datos promedio por mes de temperatura y precipitación se muestra en la Tabla 3.4 y los resultados del cálculo del TMI se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.4 Datos meteorológicos promedios históricos del sitio de proyecto

Temperatura media mensual (°C)											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
12.45	14.35	16.72	19.2	19.8	19.59	18.8	18.78	18.45	16.58	14.62	13.32
Precipitación mensual (cm)											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0.62	1.112	1.556	3.136	5.637	9.424	11.166	10.241	11.625	5.744	1.607	0.423

Tabla 3.5 Índice de humedad de Thornthwaite mensual

TMI											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
-52.81	-46.02	-46.54	-34.66	-14.93	23.09	43.39	34.59	55.42	4.15	-40.20	-57.59

3.4.3 Determinación del Índice de Humedad Thornthwaite considerando el cambio climático

Para incorporar las variaciones del cambio climático proyectados para el sitio de proyecto se requiere conocer los factores de ajuste estimados en función de un determinado escenario, los cuales son producto de los modelos globales de circulación que se utilizan para construir proyecciones futuras del cambio climático. Los escenarios se encuentran cargados en la plataforma SICliC, por lo que solo se requiere seleccionar el factor climático, el escenario del cambio climático deseado y con base en ello obtener los valores esperados en los cambios mensuales de la temperatura y la precipitación. La Figura 2.6 muestra la pantalla del SICliC donde se presenta el mapa de proyección de la precipitación promedio y una secuencia de pasos para su uso. Esta secuencia se puede hacer para cada escenario del cambio y variable climática deseada.

Estos cambios son adicionados a los datos históricos registrados en el sitio y con ellos determinar el Índice de Humedad Thornthwaite considerando el cambio climático. Para este ejercicio únicamente se utilizará el escenario SSP 4.5 para un futuro lejano.

Los TMI calculados con la temperatura media mensual y la precipitación proyectados se presentan en la Tabla 3.6. Donde se puede observar que hay una disminución del valor del TMI, por un aumento de la temperatura y una disminución de la precipitación en el futuro.

Tabla 3.6. Proyección del Índice de humedad de Thornthwaite mensual considerando el cambio climático

TMI-Cambio Climático SSP 4.5											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
-54.32	-48.89	-51.57	-40.47	-24.04	15.10	30.87	25.83	54.55	-1.71	-42.89	-58.51

3.4.4 Estimación de las propiedades del suelo con base en la variación climática

Continuando con el cálculo de los elementos de esta herramienta, se determinaron los factores que están sujetos a la variación estacional de los datos históricos y con los cambios proyectados del cambio climático (escenario SSP 4.5; futuro lejano).

Los resultados de la matriz de succión (ψ) son determinados con la Ecuación (3.7), la cual está en función del TMI. La Tabla 3.7 muestra los resultados obtenidos con datos históricos y la Tabla 3.8 considerando el cambio climático.

Tabla 3.7 Resultados de la matriz de succión del suelo con base en la variación climática mensual – Datos históricos

Matriz de succión (kPa)											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
740.14	439.41	456.04	213.23	84.13	28.93	20.70	23.59	17.82	44.97	297.21	1123.10

Tabla 3.8 Resultados de la matriz de succión del suelo con base en la variación climática mensual – Datos proyectados del cambio climático

Matriz de succión (kPa)											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
840.20	542.87	669.28	302.32	123.82	34.22	25.09	27.45	17.99	53.30	353.90	1223.42

Los cambios en la matriz de succión reflejan un incremento con el cambio climático, debido a un aumento de la temperatura y a una disminución de la precipitación. Este comportamiento se puede observar en la Figura 3.3.

3. Desarrollo de una herramienta para considerar el clima y el cambio climático en el módulo de resiliencia de la subrasante en pavimentos carreteros

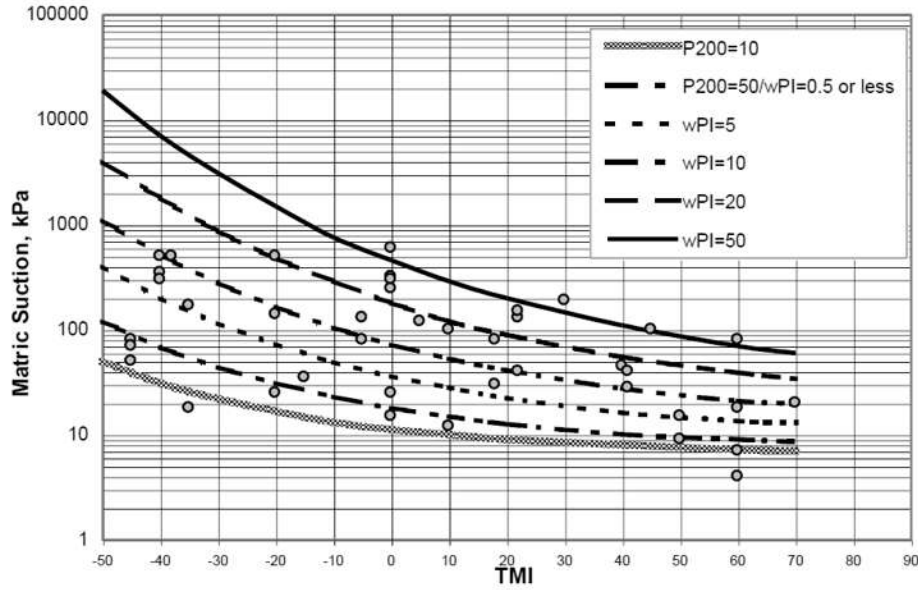


Figura 3.3. Modelo $TMI - P_{200}/wPI$ para materiales de subrasante

Fuente: Elaboración propia.

El contenido volumétrico de agua (θ_w) se determinó mediante la Ecuación (3.11), la cual está en función del TMI, por lo tanto, se obtuvieron valores mensuales que se muestran en la Tabla 3.9 para datos históricos y la Tabla 3.10 considerando el cambio climático.

Tabla 3.9 Resultados del contenido volumétrico del agua con base en la variación climática mensual – Datos históricos

Contenido Volumétrico del Agua (%)											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
30.51	30.72	30.70	31.06	31.65	32.79	33.40	33.14	33.76	32.22	30.89	30.37

Tabla 3.10 Resultados del contenido volumétrico del agua con base en la variación climática mensual – Datos proyectados del cambio climático

Contenido Volumétrico del Agua (%)											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
30.47	30.63	30.55	30.88	31.38	32.55	33.02	32.87	33.73	32.05	30.81	30.34

Finalmente se obtiene el grado de saturación (S), el cual se determina mediante la Ecuación (3.13), y los resultados mensuales se muestran en la Tabla 3.11 para datos históricos y en la Tabla 3.12 considerando el cambio climático.

Tabla 3.11 Resultados del grado de saturación con base en la variación climática mensual – Datos históricos

Grado de Saturación											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
75.02	75.52	75.49	76.36	77.82	80.62	82.12	81.47	83.01	79.22	75.95	74.67

Tabla 3.12 Resultados del grado de saturación con base en la variación climática mensual – Datos proyectados del cambio climático

Grado de Saturación											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
74.91	75.31	75.11	75.93	77.15	80.03	81.20	80.82	82.94	78.79	75.76	74.91

Dado que las proyecciones indican una disminución de la precipitación y aumentos de la temperatura, estos cambios se reflejan en un menor contenido volumétrico de agua y un grado de saturación menor para el suelo de subrasante del sitio de proyecto.

3.4.5 Factor ambiental

Para la estimación del factor ambiental se utilizó el modelo de EICM, el cual se determina mediante la Ecuación (2.6). Los resultados se presentan en la Tabla 3.13 con base en datos históricos y en la Tabla 3.14 incorporando el cambio climático. Los valores esperados de acuerdo con el EICM oscilan en valores entre 0 y 3, dependiendo de la variación del grado de saturación ($S - S_{opt}$).

Tabla 3.13. Resultados del factor ambiental con base en la variación climática mensual – Datos históricos

	Factor ambiental - EICM											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
F _{env}	1.76	1.73	1.73	1.66	1.56	1.37	1.27	1.31	1.22	1.46	1.69	1.79

Tabla 3.14 Resultados del factor ambiental con base en la variación climática mensual – Datos históricos

	Factor ambiental - EICM											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
F _{env}	1.77	1.74	1.76	1.69	1.61	1.41	1.33	1.35	1.22	1.49	1.71	1.80

Dado que se utilizó un escenario medio de emisiones, el cual implica que habrá un avance en la implementación de acciones de mitigación de gases de efecto invernadero, los resultados reflejan cambios poco significativos en la variación del factor ambiental. Sin embargo, se puede observar en todos los casos un incremento del factor ambiental, debido principalmente a un aumento de la temperatura y a una disminución de la precipitación, lo cual arroja valores que incrementarán los módulos de resiliencia óptimos.

3.4.6 Módulo de Resiliencia Óptimo

El módulo de resiliencia en su punto óptimo se obtuvo mediante ensayos de laboratorio, a través del procedimiento NCHRP 1-28 [29], para el suelo en el sitio de proyecto, y los resultados se presentan en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15 Módulo de resiliencia – Caso de estudio

Esfuerzo de confinamiento (σ_3)	Esfuerzo desviador (σ_d)	Módulo de resiliencia (M_R)	
		kPa	Psi
14	28	31	4423.65
14	48	30	4351.13
14	69	30	4278.61
14	95	29	4133.57
28	30	42	6019.06
28	49	41	5946.55
28	69	40	5728.99
28	95	38	5511.43
41	31	52	7541.96
41	50	51	7324.40
41	69	48	6961.81
41	96	47	6744.25
55	31	61	8847.30
55	50	60	8629.74
55	70	57	8194.63
55	96	55	7904.55

Dado que el valor de módulo de resiliencia no es un valor único, corresponde al diseñador la decisión de elegir el o los valores a analizar para utilizarse en el diseño de las capas del pavimento.

3.4.7 Módulo de Resiliencia en Equilibrio

El módulo de resiliencia (M_{R-eq}) para cualquier localización y temporada puede expresarse mediante la siguiente Ecuación (2.7), expresado como sigue:

$$M_{R-eq} = F_{env} * M_{R-opt}$$

Para este ejemplo utilizaremos el F_{env} obtenido con la ecuación del EICM y el M_{R-opt} máximo, mínimo y promedio. Los resultados para el módulo de resiliencia en equilibrio y el factor ambiental considerando datos históricos se presentan en la Tabla 3.16, y considerando con el cambio climático en el Tabla 3.17.

Tabla 3.16 Módulo de resiliencia en equilibrio – Datos históricos

	Módulo de Resiliencia en Equilibrio (Mpa)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
MR _{MAX}	107.61	105.27	105.45	101.43	94.99	83.42	77.69	80.13	74.43	89.05	103.29	109.28
MR _{MIN}	50.28	49.18	49.27	47.39	44.38	38.97	36.30	37.44	34.78	41.61	48.26	51.06
MR _{PRO}	77.95	76.26	76.39	73.48	68.81	60.43	56.28	58.05	53.92	64.51	74.82	79.16

Tabla 3.17 Módulo de resiliencia en equilibrio – Datos proyectados del cambio climático

	Módulo de Resiliencia en Equilibrio (Mpa)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
MR _{MAX}	108.14	106.26	107.18	103.38	97.93	85.76	81.19	82.63	74.67	90.85	104.20	109.61
MR _{MIN}	50.52	49.65	50.08	48.30	45.75	40.07	37.93	38.60	34.88	42.44	48.68	51.21
MR _{PRO}	78.33	76.97	77.64	74.89	70.94	62.12	58.81	59.85	54.09	65.81	75.48	79.40

Los resultados permiten evaluar como el módulo se modifica mensualmente, el cual está influenciado por la precipitación y la temperatura del mes. En todos los casos se puede observar como el módulo disminuye en la temporada de lluvias, ya que la succión del suelo decrece.

3.4.8 Uso de la información

Estos valores de módulo de resiliencia en equilibrio para el suelo de subrasantes o cimentación para un pavimento carretero pueden ser utilizados en el diseño de pavimentos, ya sea mediante métodos empíricos o métodos mecánico-empíricos.

La principal ventaja de contar con estos valores es que consideran el clima del sitio y si se desea, se puede considerar el cambio climático, con la finalidad de construir pavimentos más resilientes.

El diseñador de pavimentos podrá optar por diseñar con diferentes módulos, utilizar promedios o considerar el más desfavorable.

3.4.8.1 Aplicación en AASHTO-93

La sección estructural total de una sección de pavimento flexible puede consistir en una subbase, una base y la carpeta asfáltica. Esto es representado por el número estructural (SN) en la siguiente relación:

$$SN = a_1D_1 + a_2D_2 + a_3D_3 \quad (3.18)$$

Donde: a_1 , a_2 , y a_3 son coeficientes de capa asociados al tipo de material, y D_1 , D_2 , y D_3 son los espesores de la carpeta asfáltica, de la capa de base y de la capa de subbase, respectivamente, en pulgadas.

Los números estructurales (SN's) se obtienen a través de la ecuación siguiente:

$$\log(W_{18}) = Z_R \times S_o + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{1094}\right)}{0.40 + \frac{1}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \log(M_R) - 8.07 \quad (3.19)$$

Donde, W_{18} es el número estimado de aplicaciones de carga por eje equivalente a 18 kip, Z_R es la desviación normal estándar, S_o es el error típico combinado de la predicción del tránsito y la predicción del desempeño, ΔPSI es la pérdida del índice de serviciabilidad, M_R es el módulo de resiliencia (psi), y SN es el número estructural

La guía AASHTO también cuenta con un gráfico (véase Figura 3.4) para determinar el número estructural, el cual incluye todas las variables descritas en la Ecuación (3.19).

Como se observa en la Ecuación (3.19), uno de los datos a utilizar es el módulo de resiliencia, en donde se incluiría el valor de diseño que se sugiera con base en la propuesta y herramienta desarrollada, para obtener los espesores de las capas superiores.

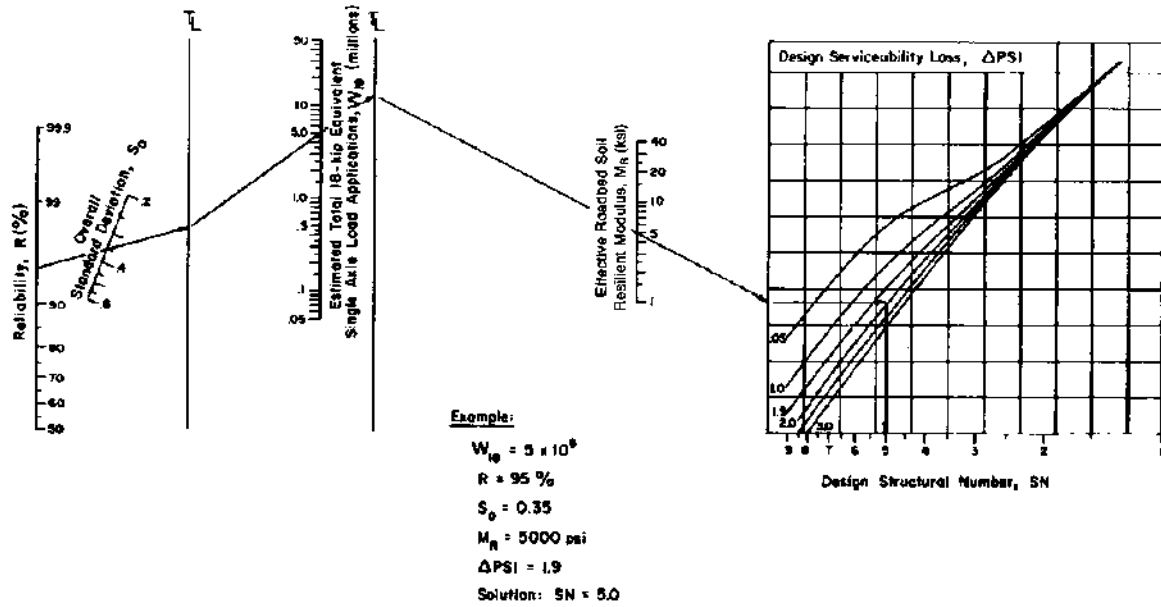


Figura 3.4 Gráfico para el diseño estructural de pavimentos flexibles – Método AASHTO

Fuente: AASHTO, 1993.

Otra forma sería utilizando módulo de resiliencia efectivo, que sugiere AASHTO (1993), donde los diferentes módulos de resiliencia estacionales que obtuvimos sean convertidos a daños relativos, posteriormente son acumulados, luego promediados y mediante un procedimiento inverso se determinar el módulo de resiliencia efectivo, como se indica en el procedimiento de la Figura 1.3.

3.4.8.2 Aplicación en el MEPDG

Para el diseño de pavimentos mecánico-empírico, el módulo de resiliencia de la subrasante es utilizado para determinar la deformación permanente del suelo mediante la ecuación:

$$\Delta_{p(suelo)} = \beta_{s1} k_{s1} \varepsilon_v h_{suelo} \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) e^{-\left(\frac{\rho}{n} \right)^\beta} \quad (3.20)$$

Donde, $\Delta_{p(suelo)}$ es la deformación permanente de la subrasante (capa/subcapa), n es el número de aplicaciones de ejes cargados, ε_0 es la intercepción determinada en laboratorio de la prueba de deformación permanente por carga repetida, ε_r es el esfuerzo resiliente establecido en ensayos de laboratorio para obtener las propiedades del material, h_{suelo} es el espesor de la capa de suelo granular, ε_v es la deformación elástica o resiliente vertical media en la capa/subcapa y calculada por el modelo de respuesta estructural, k_{s1} representa los coeficientes de calibración global, 1.673 para materiales granulares y 1.35 para materiales de grano fino; β_{s1} es la constante de calibración local para el ahuellamiento en las capas granulares, donde le fijó en 1.0 para la calibración global, y finalmente ρ que se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\rho = 10^9 \left(\frac{C_0}{(1-(10^9)\beta)} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (3.21)$$

Donde, $\log \beta = -0.61119 - 0.017638(W_c)$, donde, W_c es el contenido de agua (%) y C_0 se obtiene de la siguiente ecuación:

$$C_0 = \ln \left(\frac{a_1 M_R^{b_1}}{a_9 M_R^{b_9}} \right) = 0.0075 \quad (3.22)$$

Donde, M_R es el módulo de resiliencia de las capas granulares o subrasante, a_1 y a_9 son constantes de regresión ($a_1 = 0.15$ y $a_9 = 20$), y b_1 y b_9 son constantes de regresión ($b_1 = 0.0$ y $b_9 = 0.0$).

De esta manera se puede aplicar el módulo de resiliencia considerando el clima y el cambio climático.

4. Descripción de la funcionalidad de la herramienta a través del SICliC

Una breve descripción del Sistema de Información Climática para el Diseño de Carreteras (SICliC) se incluyó en la sección 2.3.2.

Dentro del SICliC, se debe seleccionar la estación climatológica de interés, la cual deberá ser la cercana al sitio de estudio. Para este ejemplo se utilizará un sitio de proyecto cercano al Aeropuerto Felipe Ángeles, en el Estado de México. La estación climatológica se denominada “San Mateo Acuitlapilco”. Una vez elegida la estación, se selecciona el aplicativo denominado “Módulo de resiliencia”, tal y como se ilustra en la Figura 4.1.



Figura 4.1 Selección de la estación climatológica y del aplicativo para estimar el Módulo de resiliencia.

Fuente: Elaboración propia, basada en imágenes de SICliC.

Al desplegarse el menú, se deben ingresar las propiedades de suelo índice (P_{200} es el porcentaje que pasa la malla, PI es el índice de plasticidad (%), y el diámetro (mm) del 60% del material (D_{60}). Se presiona el recuadro para obtener el resto de las propiedades del suelo, y éstas son desplegadas del lado derecho.



Figura 4.2 Selección de la estación climatológica y del aplicativo para estimar el Módulo de resiliencia.

Fuente: Elaboración propia, basada en imágenes de SICliC.

Posteriormente, se debe ingresar el o los valores de módulo de resiliencia óptimos que se obtuvieron de las pruebas de laboratorio descritos en la sección 3.3.11, o se pueden utilizar valores estimados de acuerdo con el tipo de suelo, tales y como se indican en la Tabla 3.1. Una vez ingresado los datos se presiona el recuadro para obtener el módulo de resiliencia considerando el clima. Como resultado se mostrará una tabla de resultados en el menú lateral derecho, tal y como se muestra en la Figura 4.3.

Información estación
SAN MATEO ACUITLAPILCO

Id: 15099
Latitud: 19°45'48"
Longitud: -99°25'30"
Altitud: 2250
Carretera: null
Operador: CONAGUA-DGE
Origen: null
Destino: null

Propiedades del suelo

Parámetro	Resultado
Grado de Saturación Óptima (Sopt)	88.91 %
Contenido de Humedad Óptima (Wopt)	18.15 %
Índice de plasticidad ponderado (Ipi)	8.8
Coeficiente específico del suelo (Cs)	2.72
Contenido volumétrico saturado de agua (Ist)	43.23 %

Sin cambio climático

Mes	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Enero	12.45	12.2	43.81	103.55	28.7	11.23	2.04	114.7	16.47	161.15
Febrero	14.35	11.12	24.23	400.7	28.9	11.84	1.99	88.14	138.22	
Marzo	18.72	15.58	48.48	488.5	28.88	11.81	1.88	98.22	138.34	
Abril	19.2	13.38	24.62	192.37	29.25	12.7	1.83	104.65	135.33	
Mayo	19.8	16.37	214.8	78.84	28.84	14.11	1.13	112.82	92.78	125.27
Junio	18.58	14.24	23.88	27.62	30.88	17.7	1.6	182.78	71.36	110.85
Julio	18.8	111.68	43.43	19.48	31.58	19.52	1.48	142.62	66.63	103.32
Agosto	19.78	102.11	24.88	22.18	31.22	17.38	1.54	108.98	68.68	108.48
Septiembre	18.45	118.25	45.47	16.84	31.92	19.42	1.43	138.58	43.84	98.15
Octubre	18.58	17.44	4.1	41.63	38.47	15.88	1.7	162.81	75.97	117.8
Noviembre	14.62	16.87	48.18	267.23	28.88	12.23	1.98	117.23	87.48	118.88
Diciembre	13.22	12.27	47.84	1009.83	28.58	12.85	2.07	107.88	92.35	143.14

3. Resultados basados en datos históricos:
A. Temperatura media mensual (°C)
B. Precipitación mensual (mm)
C. Índice de Humedad de Thornthwaite (TMI)
D. Matriz de succión (kPa)
E. Contenido volumétrico de agua (%)
F. Grado de saturación (%)
G. Factor ambiental
H. Módulo de resiliencia en equilibrio máximo
I. Módulo de resiliencia en equilibrio mínimo
J. Módulo de resiliencia en equilibrio promedio

Figura 4.3 Uso del aplicativo para estimar el Módulo de resiliencia.

Fuente: Elaboración propia, basada en imágenes de SICliC.

Las diferentes columnas que integran la tabla de resultados considerando el clima histórico, tales como:

- A. Temperatura media mensual (°C)
- B. Precipitación mensual (mm)
- C. Índice de Humedad de Thornthwaite (TMI)
- D. Matriz de succión (kPa)
- E. Contenido volumétrico de agua (%)
- F. Grado de saturación (%)
- G. Factor ambiental
- H. Módulo de resiliencia en equilibrio máximo
- I. Módulo de resiliencia en equilibrio mínimo
- J. Módulo de resiliencia en equilibrio promedio

La plataforma también permite incluir los datos esperados del clima en el futuro, de manera específica en la temperatura media mensual, y la precipitación mensual. La Figura 2.6 muestra cómo obtener estos cambios proyectados de acuerdo con el escenario climático seleccionado.

La Figura 4.4 muestra como ingresar los valores proyectados para la temperatura y la precipitación. Posteriormente se presiona el recuadro para calcular el módulo de resiliencia considerando el cambio climático. Como resultado se mostrará una tabla de resultados en el menú lateral derecho de manera adicional a la calculada con datos históricos.

1. Ingresar las variaciones del clima futuro, de acuerdo con el escenario deseado.

2. Presionar para obtener propiedades del suelo relacionada con el clima, estimar el TMI, el factor ambiental, así como los módulos de resiliencia en equilibrio mensuales considerando el cambio climático

3. Resultados considerando el cambio climático:

- A. Temperatura media mensual (°C)
- B. Precipitación mensual (mm)
- C. Índice de Humedad de Thornthwaite (TMI)
- D. Matriz de succión (kPa)
- E. Contenido volumétrico de agua (%)
- F. Grado de saturación (%)
- G. Factor ambiental
- H. Módulo de resiliencia en equilibrio máximo
- I. Módulo de resiliencia en equilibrio mínimo
- J. Módulo de resiliencia en equilibrio promedio

Propiedades del suelo

Parámetro	Resultado
Grado de Saturación óptima (S _{opt})	88.91 %
Contenido de Humedad Óptimo (W _{opt})	16.15 %
Índice de plasticidad ponderado (IP _w)	6.8
Gravedad específica del suelo (G _s)	2.72
Contenido volumétrico saturado de agua (θ _{sat})	60.23 %

Sin cambio climático

Mes	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Enero	13.45	1.2	153.9	1453.55	28.7	71.15	21.61	264.7	88.27	241.95
Febrero	14.35	11.12	148.22	1405.7	28.9	71.84	199.8	88.14	138.22	
Marzo	16.72	15.56	148.48	1408.5	28.69	71.82	199.89	89.22	213.34	
Abril	18.2	19.38	134.62	1323.37	29.23	72.7	193.69	88.89	133.33	
Mayo	19.9	26.37	114.9	116.84	29.64	74.17	181	87.92	80.79	125.27
Junio	19.58	34.24	23.06	27.02	36.88	77	1.6	102.73	71.36	118.65
Julio	18.8	111.66	83.43	89.48	31.59	78.52	1.46	142.42	86.82	103.32
Agosto	18.78	102.41	84.58	92.14	31.25	77.98	1.54	148.98	88.86	104.46
Septiembre	18.43	118.25	55.47	61.84	31.65	78.42	1.43	138.88	83.84	98.15
Octubre	18.58	37.44	4.1	41.63	38.41	78.59	1.7	162.83	75.87	117.8
Noviembre	14.62	16.87	148.18	1427.33	29.63	72.28	1.98	107.25	87.48	123.65
Diciembre	13.32	4.23	157.84	1469.63	28.58	79.99	2.07	107.53	82.32	143.14

Con cambio climático

Mes	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Enero	13.92	5.53	154.38	1464.72	28.63	71.23	2.05	195.64	91.4	141.73
Febrero	15.44	9.48	149.1	1495.1	28.61	71.62	2.12	192.9	89.16	135.49
Marzo	18.12	12.25	151.51	1497.19	28.74	71.44	2.03	193.93	90.8	148.69
Abril	20.81	27.53	149.5	1373.81	29.07	72.28	1.96	187.48	87.88	135.8
Mayo	21.22	36.17	124.93	112.46	29.87	73.49	1.87	178	83.18	123.99
Junio	20.77	51.22	15.08	31.84	38.74	76.41	1.64	156.83	73.28	113.83
Julio	19.88	103.86	89.81	23.49	31.21	77.89	1.58	148.78	89.81	107.78
Agosto	19.96	89.24	85.8	25.68	31.68	77.21	1.59	151.39	78.71	109.69
Septiembre	19.93	123.37	64.98	17.01	31.88	78.14	1.41	137.28	84.16	98.45
Octubre	17.82	55.95	1.65	48.01	38.24	78.18	1.74	165.68	77.41	120.03
Noviembre	15.82	15.2	142.88	1318.7	29	72.88	1.88	103.88	88.23	126.81
Diciembre	14.4	5.85	158.42	1469.33	28.62	79.83	2.08	108.87	82.54	133.48

Los resultados obtenidos pueden ser utilizados tal y como se indica en la sección 3.4.8.

Conclusiones

La revisión crítica a los métodos de diseño no permitió darnos cuenta del nivel de consideración que tienen las variables climáticas para el diseño de pavimentos flexibles, que en muchos de los casos es incorporada a través de parámetros que su comportamiento está ligado a la temperatura y la precipitación, pero no utilizan los datos de estas variables climáticas de manera directa del sitio de proyecto.

Los métodos que actualmente consideran el clima en el diseño de pavimentos utilizan datos históricos, y dado que los pavimentos se diseñan para periodos de diseño que superan los 20 años, es necesario considerar los cambios futuros del clima asociados al cambio climático.

De esta manera es necesario que clima y el cambio climático debe ser incorporado a los métodos de diseño de pavimentos, y que cada región/país debe considerar su propia metodología para hacerlo, considerando la información del clima y las proyecciones del cambio climático son diferentes para cada lugar.

La propuesta desarrollada está basada en el Sistema de Información Climática para el Diseño de Carreteras (SICliC) y el Modelo Climático Integrado Mejorado (EICM) del MEPDG de AASHTO, permite estimar Índice de Humedad Thornthwaite (TMI) con base en datos históricos de precipitación mensual y la temperatura media, y utilizando escenarios del cambio climático para México, y con este estimar un factor ambiental para materiales granulares, que influyen el módulo de resiliencia.

Los resultados de este estudio muestran que la variación climática de la temperatura media y la precipitación mensual influye el comportamiento del TMI, así como la incorporación de los cambios proyectados de estos factores de acuerdo con los escenarios del cambio climático utilizados.

Los casos de estudio permitieron demostrar que el procedimiento propuesto permite incorporar adecuadamente el clima y el cambio climático del sitio de proyecto, a través del TMI. Este factor es útil en la determinación de la variación del grado de saturación del suelo, y con ello determinar el factor ambiental que se utiliza en el modelo EICM. En los resultados se puede observar las variaciones del factor ambiental en función del TMI mensual, obteniendo factores más bajos cuando la precipitación del sitio del proyecto aumenta, y factores más altos cuando la precipitación decrece.

Los factores ambientales permitirán evaluar cómo el módulo de resiliencia óptimo se modifica mensualmente, debido a la variación de la precipitación mensual y la temperatura media de cada mes, y con ello estimar el módulo resiliencia en equilibrio para el suelo de subrasantes o capas granulares para el diseño de pavimentos.

La consideración del clima y el cambio climático del sitio del proyecto en el diseño de pavimentos, particularmente el módulo de resiliencia permitirá aumentar la durabilidad y la resiliencia de los pavimentos.

Las capas de materiales granulares (base, subbase, subrasante o suelo de cimentación) están determinadas por el módulo de resiliencia, el cual es un parámetro importante en el diseño de pavimentos, que además de representar propiedades mecánicas, permite considerar variaciones climáticas por los cambios en el contenido de agua y la succión del suelo.

El módulo de resiliencia proporciona una medida del comportamiento de la carga-esfuerzo la cual induce una deformación del suelo y de las capas granulares, influyendo en el comportamiento del sistema estructural del pavimento. El factor que más influye en el diseño es debido al tránsito y a las condiciones ambientales de suelo de la subrasante

La herramienta desarrollada, además de estimar Índice de Humedad Thornthwaite (TMI), con base en datos históricos y futuros, permite predecir el comportamiento de variables que influyen el módulo de resiliencia y que están asociadas al clima, tales como el contenido de humedad, la matriz de succión y el grado de saturación, mediante los cuales se puede estimar un factor ambiental para materiales granulares. Este factor permite ajustar el módulo de resiliencia óptimo en un módulo de resiliencia en equilibrio para el sitio de proyecto.

Los resultados de este estudio muestran que la variación climática influye el comportamiento del módulo de resiliencia, debido a cambios en las condiciones de equilibrio iniciales, la fluctuación estacional de la precipitación y la temperatura, y de los cambios proyectados del cambio climático.

El ejemplo práctico permitió constatar que las estimaciones realizadas permiten considerar adecuadamente el clima y el cambio climático en el módulo de resiliencia. En los resultados se puede observar las variaciones del módulo en función del TMI mensual, obteniendo módulos más bajos cuando la precipitación del sitio del proyecto aumenta, y por lo tanto tener módulos más altos cuando en baja o ausencia de precipitación.

La herramienta propuesta es fácil de utilizar a través de SICliC, pero también se pueden utilizar de manera independiente a esta plataforma, solo es importante contar con los datos del suelo del sitio y la meteorología del lugar (precipitación y temperatura), por lo que puede ser adaptada y utilizada en cualquier parte del mundo.

La consideración del clima y el cambio climático del sitio del proyecto en el diseño de pavimentos, particularmente el módulo de resiliencia de la subrasante permitirá aumentar la durabilidad y la resiliencia de los pavimentos.

La aproximación para incorporar el clima y el cambio climático presentada en esta investigación puede convertirse en una herramienta práctica para poder incluir el clima en casi cualquier método de diseño de pavimentos, así como poder incorporar las variaciones futuras para la ubicación del sitio de proyecto, particularmente en el diseño mecánico-empírico de pavimentos.

Futuras investigaciones, para completar la inclusión del clima y del cambio climático en el diseño de pavimentos deben diseñar y desarrollar una herramienta práctica para considerar la temperatura y su variabilidad actual y futura en el módulo dinámico de las mezclas asfálticas.

Bibliografía

1. Ali, Hesham A.; Lopez, Aramis. (1996). Statistical Analyses of Temperature and Moisture Effects on Pavement Structural Properties Based on Seasonal Monitoring Data. Transportation Research Record. Journal of Transportation Research Board. <https://doi.org/10.1177/0361198196154000107>
2. Ackah, F.S., Zhuochen, N. & Huaiping, F. (2021). Effect of wetting and drying on the resilient modulus and permanent strain of a sandy clay by RLTT. Int. J. Pavement Res. Technol. 14, 366–377. <https://doi.org/10.1007/s42947-020-0067-3>
3. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (1986). Guide for design of pavement structures. Washington, DC.
4. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (1993). Guide for design of pavement structures. ISBN 1-56051-055-2. Washington, DC.
5. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2007). Determining the resilient modulus of soils and aggregate materials. T 307-99. Washington, DC.
6. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2008). Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. A manual of practice. ISBN 978-1-56051-423-7. Washington, DC.
7. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2015). Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. A manual of practice. ISBN 978-1-56051-597-5. Washington, DC.
8. American Association of State Highway Officials (AASHO). (1961). AASHO Interim Guide for Design of Pavement Structures. Washington, DC.
9. Ankit, Gupta; Kumar, Praveen; Rastogi, Rajat. (2011). Effect of Environmental Factors on Flexible Pavement Performance Modeling. 8th International Conference on Managing Pavement Assets, November 15-19, 2011, Santiago, Chile: "Fulfilling the Social, Economic and Environmental Responsibility for Sustainable, Well Managed, Better Roads".
10. Arias Barrantes, Eliécer. (2020). Propuesta para una guía de diseño mecánica-empírica para pavimentos flexibles y semi-rígidos de Costa Rica. Tesis. Universidad de Costa Rica.

11. Asphalt Institute (AI). (1970). Thickness design – Full depth asphalt pavement structures for highways and streets. Manual Series No.1 (MS-1). Revised eight edition.
12. Asphalt Institute (AI). (1999). Thickness Design - Asphalt Pavements for Highways and Streets. Ninth Edition.
13. Austroads Ltd. (2010). Impact of Climate Change on Road Performance: Updating Climate Information for Australia. Austroads Research Report AT1479. ISBN 978-1-921709-16-6
14. Baladi, Gilbert. (1989). Fatigue Life and Permanent Deformation Characteristics of Asphalt Concrete Mixes. Transportation Research Record 1227, TRB, National Research Council, 75-87.
15. Barber, E.S. (1946). Application of Triaxial Compression Test Results to the Calculation of Flexible Pavement Thickness. Proceedings Highway Research Board. Vol. 26. Washington, D.C.
16. Bhandari, Sushmita; Luo, Xiaohua; Wang, Feng. (2023). Understanding the effects of structural factors and traffic loading on flexible pavement performance. International Journal of Transportation Science and Technology, Volume 12, Issue 1, Pages 258-272. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2022.02.004>
17. Cho, Y.-H., McCullough, B. F., & Weissmann, J. (1996). Considerations on Finite-Element Method Application in Pavement Structural Analysis. Transportation Research Record, 1539(1), 96–101. <https://doi.org/10.1177/0361198196153900113>
18. California Department of Transportation (CalTrans). (2004). Analysis of 30 Years of Pavement Temperatures using the Enhanced Integrated Climate Model (EICM). Pavement Research Center. University of California.
19. Cary Carlos E.; Zapata, Claudia E. (2010). Enhanced Model for Resilient Response of Soils Resulting from Seasonal Changes as Implemented in Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Volume 2170, Issue 1, <https://doi.org/10.3141/2170-05>
20. Corro Caballero, Santiago; Prado Ollervide, Guillermo. (1974). Diseño estructural de carreteras con pavimento flexible. Series del Instituto de Ingeniería No. 325. UNAM. México, DF.
21. Corro, Santiago; Magallanes, Roberto; Prado, Guillermo. (1981). Instructivo para el diseño estructural de pavimentos flexibles para carreteras. Series del Instituto de Ingeniería No. 444. UNAM. México, DF.

-
22. Dan, Han-Cheng; Xin, Pei; Li, Ling; Li, Liang; Lockington, David (2012). Capillary effect on flow in the drainage layer of highway pavement. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39(6), 654–666. <https://doi.org/10.1139/I2012-050>
 23. Davis, W.C.; Jones, W.G. (1954). *Flexible-Pavement Design by the Group Index Method*. Missouri State Highway Department. Division of materials.
 24. Edil, Tuncer B.; Motan, Sabri E. (1979). Soil-water potential and resilient behavior of subgrade soils. 58th. Annual Meeting of the Transportation Research Board. Issue Number: 705, pp 54-63.
 25. Elliott, Robert P.; Thornton, Sam I. (1988). Resilient Modulus and AASHTO Pavement Design. *Transportation Research Record*, No 1196, TRB National Research Council, National Academy Press, Washington D.C., pp 116-124
 26. Fredlund, Delwyn G.; Xing, Anqing. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*. 31(4): 521-532. <https://doi.org/10.1139/t94-061>
 27. Freeman, Reed B.; Harr, Milton E. (2004). Stress Predictions for Flexible Pavement Systems. *Journal of Transportation Engineering*. Volume 130 Issue 4. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2004\)130:4\(495\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:4(495))
 28. Garnica Anguas, Paul; Pérez García, Natalia; Gómez López, José Antonio. (2001). Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares. *Publicación Técnica No. 142*. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México.
 29. Garnica, Paul; Hernández, Roberto; Castellanos, Alejandro. (2016). El IMT-PAVE 3.0, una herramienta para el diseño estructural de pavimentos. *Boletín Notas del Instituto Mexicano del Transporte*, No. 159, marzo-abril 2016, artículo 3.
 30. Gao, Lian-sheng; Dan, Han-cheng; Li, Liang. (2019). Response Analysis of Asphalt Pavement under Dynamic Loadings: Loading Equivalence. *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2019, Issue 1, 7020298. <https://doi.org/10.1155/2019/7020298>
 31. Ghanizadeh, A. R.; Ahadi, M. R. (2015). Application of Artificial Neural Networks for Analysis of Flexible Pavements under Static Loading of Standard Axle. *International Journal of Transportation Engineering*, 3(1), 31-43. <https://doi.org/10.22119/ijte.2015.13361>
 32. Haas, R.; Hudson, W.R.; Zaniewski, J. (1994). *Modern pavement management*. Krieger publishing company. Malabar, Florida.

33. Haas, Ralph. (2001). Reinventing the (pavement management) wheel. Distinguished lecture, Fifth International Conference on Managing Pavements, Seattle, WA, August 11-14, 2001.
34. Harvey, John; Basheer, Imad. (2011). California's Transition to Mechanistic-Empirical Pavement Design. Technology Transfer Program, Vol 3, No.1.
35. Hicks, R.G.; Monismith, C.L. (1971). Factors Influencing the Resilient Response of Granular Materials. Highway Research Record 345, HRB, National Research Council, Washington, D.C., 1971, pp. 15-31.
36. Highway Research Board (HRB). (1970). Review of existing theories and methods of pavement design. Highway Research Circular No. 112. National Academy of Sciences – National Research Council.
37. Houston, W.N.; Mirza, M.W.; Zapata, C.E. (2006). NCHRP Project No. 9.-23 "Environmental effects in pavement mix and structural design systems: Calibration and validation of the ICM Version 2.6", Final Report
38. Houston, W.N.; Mirza, M.W.; Zapata, C.E. (2006). NCHRP Project No. 9.-23 "Environmental effects in pavement mix and structural design systems: Calibration and validation of the ICM Version 2.6", Final Report-Part 2. AASTHO & FHWA, Washington, DC.
39. Huang, Yang H. (2004). Pavement analysis and design. Second edition. Pearson Prentice Hall. ISBN 0-13-142473-4. USA.
40. Hveem, F. N.; Zube, E.; Bridges, R.; Forsyth, R. (1963). The Effect of Resilience-Deflection Relationship on the Structural Design of Asphaltic Pavements. Proceedings of the International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, 1962, Univ. of Michigan, pp. 649-666
41. Indian Road Congress (IRC). (2018). Guidelines for the design of flexible pavements. Fourth Revision. IRC: 37-2018.
42. Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR). (2016). ALIZE-LCPC. Software for pavement structures analysis and design. User Manual, Version 1.5.
43. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2022). Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático. <https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/> (consultada 02/06/2024)
44. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2023). Sistema de Información sobre el Cambio Climático. <https://gaia.inegi.org.mx/sicc/> (consultada 02/06/2024)

-
45. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change (IPCC). (2000). Special Report on Emissions Scenarios. A special report of working group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK.
46. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
47. Khoury, N. N., & Zaman, M. M. (2004). Correlation between resilient modulus, moisture variation, and soil suction for subgrade soils. *Transportation Research Record*, 1874(1), 99–107. <https://doi.org/10.3141/1874-11>
48. Knott, Jayne F.; Sias, Jo E.; Dave, Eshan V.; Jacobs, Jennifer M. (2019). Seasonal and Long-Term Changes to Pavement Life Caused by Rising Temperatures from Climate Change. *Journal of Transportation Research Record*. 2019, Vol. 2673(6) 267–278 <https://doi.org/10.1177/0361198119844249>
49. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) et Le Service D'études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA). (1994). Conception et dimensionnement des structures de chaussées: Guide technique national.
50. Larson, Gregg; Dempsey, Barry J. (1997). Enhanced Integrated Climatic Model Version 2.0. Minnesota Department of Transportation Road Research Project. Final Report DTFA MN/DOT 72114. University of Illinois. USA.
51. Li, Qiang; Mills, Lesli; McNeil, Sue. (2011). The Implications of climate change on pavement performance and design. University of Delaware University Transportation Center (UD-UTC). Delaware, USA.
52. Li, Yuanyuan; Feng, Jianlin; Wu, Shaopeng; Che, Anqui; Kuang, Dongliang; Bai, Tao; Gao, Yangming; Zhang, Jizhe; Li, Linglin; Wan, Liyao; Liu, Quantao; Chen, Zongwu; Gu, Dengjun. (2022). Review of ultraviolet ageing mechanisms and anti-ageing methods for asphalt binders. *Journal of Road Engineering*. Volume 2, Issue 2, June 2022, Pages 137-155 <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2022.04.002>
53. Lu, Donghui; Tighe, Susan L.; Xie, Wei-Chau. (2018). Impact of flood hazards on pavement performance. *International Journal of Pavement Engineering*, 21:6, 746-752, <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1508844>
54. Lytton, R.L.; Pufahl, D.E.; Michalak, C.H.; Liang, H.S.; Dempsey, B.J. (1989). An integrated model of the climatic effects on pavements. Final report. Texas

- Transportation Institute. Texas A&M University. Report: FHWA-RD-90-033. Federal Highway Administration. USA.
55. Mallick, R.B., Tao, M., M. K., N. (2018). Impact of Flooding on Roadways. In: Krishna, A., Dey, A., Sreedeeep, S. (eds) Geotechnics for Natural and Engineered Sustainable Technologies. Developments in Geotechnical Engineering. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7721-0_23
56. McDowell, Chester. (1954). Triaxial Tests in Analysis of Flexible Pavements. Texas Highway Department. Highway Research Board. Research Report 16b-001. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbresearchrpts/1954/16b-001.pdf>
57. Meagher, W.; Daniel, J. S.; Jacobs, J.; Linder, E. (2012). Method for Evaluating Implications of Climate Change for Design and Performance of Flexible Pavements. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2305, Transportation Research Board of the National Academies, pp. 111–120. <https://doi.org/10.3141/2305-12>
58. Mendoza Sánchez, Juan Fernando; Adame Valenzuela, Eduardo; Luz Angélica Gradilla Hernández; Alonso Guzman, Elia Mercedes; Marcos Palomares, Omar Alejandro. (2021). Sistema de Información Climática para el Diseño de Infraestructura Carretera. Publicación Técnica No. 636. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México.
59. Mendoza Sánchez, Juan Fernando; Alonso Guzman, Elia Mercedes; Martinez Molina, Wilfrido. (2022). Análisis de la influencia del clima y su variabilidad en la vida útil de un pavimento. X Congreso Nacional de Alconpat México. <https://doi.org/10.21041/memoriasdecongresoXCNAM2022-Publicadoen2023>
60. Mills, Brian; Tighe, Susan; Andrey, Jean; Huen, Ken; Parm, Suzanne. (2006). Climate change and the performance of pavement infrastructure in southern Canada: Context and case study. IEEE EIC Climate Change Conference, Ottawa, ON, 2006, pp. 1-9, <https://doi.org/10.1109/EICCCC.2006.277185>
61. Mills, Brian N.; Tighe, Susan L.; Andrey, Jean; Smith, James T.; Parm, Suzanne; Huen, Ken. (2007). The road well-traveled: Implications of climate change for pavements infrastructure in Southern Canada. University of Waterloo. Ontario, Canada
62. Mills, Brian; Tighe, Susan; Andrey, Jean; Smith, Huen, Ken. (2009). Climate Change Implications for Flexible Pavement Design and Performance in Southern Canada. Journal of Transportation Engineering. American Society of Civil Engineers [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2009\)135:10\(773\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2009)135:10(773))

-
63. Mincad Systems Pty Ltd (2022). CIRCLY Users' Manual, Version 7.0. Richmond, Australia.
64. Molenaar, A. A. A.; Van Gorp. (1980). Optimization of the thickness design of asphalt concrete. Proc., 10th Australian Road Research Board Conference. Vol. 10 No. 2, 1980, pp. 31-44.
65. Moossazadeh, J.; Witczak, M.W. (1981). Prediction of Subgrade Moduli for Soil that Exhibits Nonlinear Behavior. Transportation Research Record 810. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
66. Muench, S. T.; Van Dam, T. J. (2015). TechBrief: Climate change adaptation for pavements. FHWA-HIF-15-015. 27. Federal Highway Administration.
67. Mulugeta Alamnie, Mequanent; Taddesse, Ephrem; Hoff, Inge. (2023). A study on permanent deformation and fatigue damage interaction in asphalt concrete. Construction and Building Materials, Volume 407, 2023, 133473, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133473>
68. Naji, K. (2016). Resilient modulus–moisture content relationships for pavement engineering applications. International Journal of Pavement Engineering, 19(7), 651–660. <https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1199877>
69. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2014). Strategic Issues Facing Transportation, Volume 2: Climate Change, Extreme Weather Events, and the Highway System: Practitioner's Guide and Research Report. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/22473>
70. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). (2004). Research Results Digest No. 285 "Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design". Washington, DC, USA.
71. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). (2008). Calibration and Validation of the Enhanced Integrated Climatic Model for Pavement Design. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/23098>
72. Nikolaidis A., G. Tsohos, and A. Papavasileiou. (1997). Pavement Design Guide. Submitted Report. Thessaloniki: Egnatia Odos S.A.
73. Nikolaidis, Athanassios. (2015). Highway engineering: Pavements, materials and control of quality. Taylor & Francis Group Ed. ISBN 13: 978-1-4665-7997-2.

74. Odemark, N. (1949). Investigations on the elastic properties of soils and the design of pavements according to the theory of elasticity. Statens Vaeginstitute, Stockholm, Sweden.
75. Palmer, L. A.; Barber, E. S. (1940). Soil displacement under a circular loaded area. Proceedings Highway Research Board Vol. 20. Pages 279-286.
76. Pais, J.C.; Amorim, S.I.R.; Minhoto, M.J.C. (2013). Impact of Traffic Overload on Road Pavement Performance. Journal of Transportation Engineering. Volume 139 Issue 9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000571](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000571)
77. Perera, Yugantha Yasanayake. (2003). Moisture equilibria beneath paved areas. PhD Dissertation, Arizona State University, Arizona, USA.
78. Perera, Y., Zapata, C., Houston, W. y Houston, S. (2004). Long-term moisture conditions under highway pavements. Geotechnical Engineering for Transportation Projects, ASCE Geo-Institute. Los Angeles, CA, 1, 1132-1143 [https://doi.org/10.1061/40744\(154\)102](https://doi.org/10.1061/40744(154)102)
79. Perera, Y. Y.; Zapata, C. E.; Houston, W. N.; Houston, S. L. (2012). Long-Term Moisture Conditions under Highway Pavements. Geotechnical Engineering for Transportation Projects, Proceedings, 1132-1143, [https://doi.org/10.1061/40744\(154\)102](https://doi.org/10.1061/40744(154)102)
80. Plati, Cristina. (2019). Sustainability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: A literature review. Construction and Building Materials Journal. Volume 211, 30 June 2019, Pages 539-555. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.242>
81. Porter, O. J. (1950). Development of CBR Flexible Pavement Design Method for Airfields: A Symposium: Development of the Original Method for Highway Design. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1949, Vol. 75, Issue 1, Pg. 11-17
82. Qiao, Yaning; Flintsch, Gerardo W.; Dawson, Andrew R.; Parry, Tony. (2013) Examining Effects of Climatic Factors on Flexible Pavement Performance and Service Life. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2349, Transportation Research Board of the National Academies, pp. 100–107. <https://doi.org/10.3141/2349-12>
83. Qiao Y, Santos J, Stoner AM, Flinstch G. (2019). Climate change impacts on asphalt road pavement construction and maintenance: An economic life cycle assessment of adaptation measures in the State of Virginia, United States. Journal of Industrial Ecology. 2020; 24:342–355. <https://doi.org/10.1111/jiec.12936>

-
84. Rahman, M.M.; Gassman, S.L.; Islam, K.M. (2023). Effect of Moisture Content on Subgrade Soils Resilient Modulus for Predicting Pavement Rutting. *Geosciences* 2023, 13, 103. <https://doi.org/10.3390/geosciences13040103>
85. Rauhut, J.B.; Gendeü, D.S. (1987). Proposed development of pavement performance prediction models from SHRP/LTPP Data. Proceedings of second Northamerican conference on managing pavements, Vol. 2, pp 221-237. Toronto, Canada.
86. Rosenbalm, D. (2011). Reliability associated with the estimation of soil resilient modulus at different hierarchical levels of pavement design. Master's thesis. Arizona State University.
87. Russam, Kenneth; Coleman, J. D. (1961). The Effect of Climatic Factors on Subgrade Moisture Conditions. *Géotechnique*, Volume 11 Issue 1, March 1961, pp. 22-28. <https://doi.org/10.1680/geot.1961.11.1.22>
88. Rys, Dawid; Judycki, Jozef; Jaskula, Piotr. (2015): Analysis of effect of overloaded vehicles on fatigue life of flexible pavements based on weigh in motion (WIM) data, *International Journal of Pavement Engineering*. Volume 17, 2016 - Issue 8. <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1019493>
89. Saha, Sajib; Hariharan, Narain; Gu, Fan; Luo, Xue; Little, Dallas N.; Lytton, Robert L. (2019). Development of a mechanistic-empirical model to predict equilibrium suction for subgrade soil. *Journal of Hydrology*, Volume 575, 221-233, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.035>
90. Salar Shahini Shamsabadi, Yasamin Sadat Hashemi Tari, Ralf Birken, Ming Wang. (2014). Deterioration Forecasting in Flexible Pavements Due to Floods and Snow Storms. EWSHM - 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, IFFSTTAR, Inria, Université de Nantes, Jul 2014, Nantes, France.
91. Scala, A. J. (1962). Environmental factors in flexible pavement design. Flexible pavement design Proceedings. Paper no. 66. Australian Road Research Board.
92. Schwartz, Charles W.; Carvalho, Regis L. (2007). Implementation of the NCHRP 1-37A design guide. Volume 2: Evaluation of Mechanistic-Empirical Design Procedure. University of Maryland. Maryland State Highway Administration. Baltimore, USA.
93. Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA). (2002). Manual centroamericano para el diseño de pavimentos.
94. Seed H. B., Chan C. K., Lee C. E. (1962). "Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures in asphalt pavements", In
-

- Conference Proceedings of the International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. 1, Ann Arbor, USA, pp. 611-636.
95. Seed, H. B.; Chan, C. K. (1964). Effect of duration of stress application on soil deformation under repeated loading. Proceedings of the Fifth International Conference on Soils, Mech. and Found, Eng., Vol. 1, pp. 340-345
96. Seed, H. B.; Mitry, F. G.; Monismith, C. L.; Chan, C. K. (1967a). Factors influencing the resilient deformations of untreated aggregate base in two-layer pavements subjected to repeated loading. Highway Research Board. Issue Number: 190, pp 19-57
97. Seed, H. B.; Mitry, F. G.; Monismith, C. L.; Chan, C. K. (1967b). Prediction of flexible pavement deflections from laboratory repeated-load tests. Transportation Research Board. Report No. 35. ISSN: 0077-5614
98. Shell International Petroleum Company, Ltd. (1977). Design charts for flexible pavements. Fifth reprint. London, England.
99. Shell International Petroleum Company, Ltd. (1978). Shell pavement design manual: Asphalt pavements and overlays for road traffic. London, England.
100. Shell International Petroleum Company. (2015). The Shell Bitumen Handbook, Sixth edition. Hunter, Rober N. Self, Andy and Read, John. ISBN 978-0-7277-5837-8. London, United Kingdom.
101. Sirin, O.; Gunduz, M.; Shamiyeh, M.E. (2019). Assessment of Pavement Performance Management Indicators Through Analytic Network Process. IEEE Transactions on Engineering Management. <https://doi.org/10.1109/TEM.2019.2952153>
102. Smith, Brian E.; Witczak, Matthew W. (1981). Equivalent Granular Base Moduli: Prediction. Transportation Engineering Journal of ASCE, Volume 107, Issue 6 - November 1981. <https://doi.org/10.1061/TPEJAN.0000957>
103. Solaimanian, Mansour; Bolzan, Pablo. (1993). Analysis of the integrated model of climatic effects on pavements. Strategic Highway Research Program. Washington, DC.
104. State Highway Commission of Kansas (1947). Design of flexible pavement using the triaxial compression test. Highway Research Board. Bulletin No. 8. Washington, D.C.
105. Su, Yu; Cui, Yu-Jun; Dupla, Jean-Claude; Canou, Jean. (2021). Effect of water content on resilient modulus and damping ratio of fine/coarse soil mixtures with varying coarse grain contents. Transportation Geotechnics. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100452>

-
106. Sudarsanan, Nithin; Kim, Youngsoo Richard. (2022). A critical review of the fatigue life prediction of asphalt mixtures and pavements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, Volume 9, Issue 5, 2022, Pages 808-835, <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.05.003>
107. Swarna, Surya T.; Hossain, Kamal. (2022). Climate change impact and adaptation for highway asphalt pavements: a literature review. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 49(7), 1109-1120, <https://doi.org/10.1139/cjce-2021-0209>
108. Tanquist, B. A. (2001). Reliability, Damage, and Seasonal Considerations in the MnPAVE Mechanistic-Empirical Asphalt Pavement Design Computer Program. Minnesota Department of Transportation.
109. Taylor, Michael A.P.; Philp, Michelle L. (2015a). Investigating the impact of maintenance regimes on the design life of road pavements in a changing climate and the implications for transport policy, *Transport Policy*, Volume 41, 2015, Pages 117-135. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2015.01.005>
110. Taylor, Michael A. P.; Philp, Michelle L. (2015b). Beyond agriculture – A review of the Thornthwaite Moisture Index with respect to road pavements and other infrastructure applications. *International Journal of Sustainable Transportation*. Volume 10, Issue 6, 2016, Pages 528-540.
111. Teltayev, B.B.; Suppes, E.A. (2019). Temperature in pavement and subgrade and its effect on moisture. *Case Studies in Thermal Engineering*. Volume 13, March 2019, 100363. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.11.014>
112. Terzaghi, Karl. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. ISBN 9780470172766. John Wiley & Sons, Inc.
113. Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review* Vol. 38, No. 1, pp. 55-94 (48 pages). <https://doi.org/10.2307/210739>
114. Transportation Research Board (TRB). (2007). *Pavement Lessons Learned from the AASHO Road Test and Performance of the Interstate Highway System*. Transportation Research Circular E-C118, Washington, DC.
115. Transportation Research Laboratory Limited (TRL). (2008). *The effects of climate change on highway and pavements and how to minimize them: Technical report*.
116. Ud Din, Ishfaq Mohi; Mir, Mohammad Shafi; Farooq, Mohammad Adnan. (2020). *Effect of Freeze-Thaw Cycles on the Properties of Asphalt Pavements*
-

- in Cold Regions: A Review. *Transportation Research Procedia*, Volume 48, 2020, Pages 3634-3641. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.087>
117. Underwood, B. Shane. (2019). A method to select general circulation models for pavement performance evaluation. *International Journal of Pavement Engineering*, Vol 22, 2021 (2), 134-136, <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1580365>
118. University of California (UC) – Davis. (2020). CalME: Caltrans Mechanistic-Empirical Structural Analysis Program for Flexible Pavements. University of California Pavement Research Center (UCPRC).
119. Uzan, Jacob. (1985). Characterization of granular material. *Transportation Research Record 1022*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
120. Uzan, Jacob. (2004). Permanent Deformation in Flexible Pavements. *Journal of Transportation Engineering*, Vol 130, No 1, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2004\)130:1\(6\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:1(6))
121. Vásquez-Varela, Luis R.; García-Orozco, Francisco J. (2019). UNLEA: A Multilayer Elastic Program Script in Scilab. *International Airport and Highway Pavements Conference 2019 Proceedings*, 91-100. <https://doi.org/10.1061/9780784482452.010>
122. Wang, Yuhong; Wang, George; Ahn, Yong Han. (2012). Impact of Climate Conditions on Effectiveness of Asphalt Pavement Preservation Techniques. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2292, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC. <https://doi.org/10.3141/2292-09>
123. Wang, W.; Wang, L.; Miao, Y.; et al. (2020). A survey on the influence of intense rainfall induced by climate warming on operation safety and service life of urban asphalt pavement. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience* 1, 4. <https://doi.org/10.1186/s43065-020-00003-0>
124. Wistuba, Michael P.; Walther, Axel. (2013) Consideration of climate change in the mechanistic pavement design, *Road Materials and Pavement Design*, 14:sup1, 227-241. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.774759>
125. Witczak, M. W. and Uzan, J. (1988). The Universal Airport Pavement Design System. Report I of IV: Granular Material Characterization. University of Maryland, College Park, MD, USA.
126. Witczak, M. W., D. Andrei, and W. N. Houston. (2000). Resilient Modulus as Function of Soil Moisture – Summary of Predictive Models. *Development of the 2002 Guide for the Development of New and Rehabilitated Pavement*

- Structures, NCHRP 1-37 A, Inter Team Technical Report (Seasonal 1), Tempe, AZ
127. Witczak, M.W.; Zapata, C.E.; & Houston, W.N. (2006). Models incorporated into the current enhanced integrated climatic model: NCHRP 9-23 Project findings and additional changes after version 0.7 - Final report, Project NCHRP 1-40D. AASTHO & FHWA, Washington, DC.
128. World Road Association (PIARC). (2012). Dealing with the Effects of Climate Change on Road Pavements. Technical report 2012R06EN. Technical Committee D.2 Road Pavements. ISBN 2-84060-247-4
129. Xueying Zhao; Aiqin Shen; Baofu Ma. (2020). Temperature response of asphalt pavement to low temperatures and large temperature differences, *International Journal of Pavement Engineering*, 21:1, 49-62. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1435883>
130. Yaghoubi, Ehsan; Disfani, Mahdi M.; Arulrajah, Arul; Kodikara, Jayantha. (2016). Impact of Compaction Methods on Resilient Response of Unsaturated Granular Pavement Material. *Advances in Transportation Geotechnics III. Procedia Engineering Vol 143. Pp. 323-330* <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.041>
131. Yu H.; Bai X.; Qian G.; Wei H.; Gong X.; Jin J.; Li Z. (2019). Impact of Ultraviolet Radiation on the Aging Properties of SBS-Modified Asphalt Binders. *Polymers (Basel)*. 2019 Jul 1;11(7):1111. <https://doi.org/10.3390%2Fpolym11071111>
132. Zaman, Musharraf; Chen, Dar-Hao; Laguros, Joakim. (1994). Resilient Moduli of Granular Materials. *Journal of Transportation Engineering. American Society of Civil Engineers. Pp 967-988.* [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1994\)120:6\(967\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1994)120:6(967))
133. Zapata C. E. (1999) "Uncertainty in Soil-Water-Characteristic Curve and Impacts on Unsaturated Shear Strength Predictions." PhD Dissertation, Arizona State University, Arizona, USA.
134. Zapata, C., Andrei, D., Witczak, M. W., & Houston, W. N. (2007). Incorporation of environmental effects in pavement design. *Road Materials and Pavement Design*, 8(4), 667-693. <https://doi.org/10.3166/rmpd.8.667-693>
135. Zapata, Claudia E.; Yu, Bill; Mosawi, Mohammad, Olaiz, Austin, Dong, Shaoyang. (2019). Proposed enhancements to pavement ME design: Improved consideration of the influence of subgrade soils susceptible to shrink/swell and/or frost heave on pavement performance. *The National*

Cooperative Highway Research Program (NCHRP). Transportation Research Board. Interim Report. Project No. 01-59.

Anexo 1 Factor de ajuste PET

Tabla A.1 Posible Duración Promedio de Luz Solar - Hemisferio Norte

Latitud Norte	Enero	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5	1.02	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02
10	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
15	0.97	0.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	0.95	0.97
20	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.94
25	0.93	0.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.17	1.12	1.02	0.99	0.91	0.91
26	0.92	0.88	1.03	1.06	1.15	1.15	1.17	1.12	1.02	0.99	0.91	0.91
27	0.92	0.88	1.03	1.07	1.16	1.15	1.18	1.13	1.02	0.99	0.90	0.90
28	0.91	0.88	1.03	1.07	1.16	1.16	1.18	1.13	1.02	0.98	0.90	0.90
29	0.91	0.87	1.03	1.07	1.17	1.16	1.19	1.13	1.03	0.98	0.90	0.89
30	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
31	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.18	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
32	0.89	0.86	1.03	1.08	1.19	1.19	1.21	1.15	1.03	0.98	0.88	0.87
33	0.88	0.86	1.03	1.09	1.19	1.20	1.22	1.15	1.03	0.97	0.88	0.86
34	0.88	0.85	1.03	1.09	1.20	1.20	1.22	1.16	1.03	0.97	0.87	0.86
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
36	0.87	0.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	0.97	0.86	0.84
37	0.86	0.84	1.03	1.10	1.22	1.23	1.25	1.17	1.04	0.97	0.85	0.83
38	0.85	0.84	1.03	1.10	1.23	1.24	1.25	1.17	1.04	0.96	0.84	0.83
39	0.85	0.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18	1.04	0.96	0.84	0.82
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
41	0.83	0.83	1.03	1.11	1.25	1.26	1.27	1.19	1.04	0.96	0.82	0.80
42	0.82	0.83	1.03	1.12	1.26	1.27	1.28	1.19	1.04	0.95	0.82	0.79
43	0.81	0.82	1.02	1.12	1.26	1.28	1.29	1.20	1.04	0.95	0.81	0.77
44	0.81	0.82	1.02	1.13	1.27	1.29	1.30	1.20	1.04	0.95	0.80	0.76
45	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
46	0.79	0.81	1.02	1.13	1.29	1.31	1.32	1.22	1.04	0.94	0.79	0.74
47	0.77	0.80	1.02	1.14	1.30	1.32	1.33	1.22	1.04	0.93	0.78	0.73
48	0.76	0.80	1.02	1.14	1.31	1.33	1.34	1.23	1.05	0.93	0.77	0.72
49	0.75	0.79	1.02	1.14	1.32	1.34	1.35	1.24	1.05	0.93	0.76	0.71
50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.73	0.70

Fuente: Houston *et al*, 2006

Tabla A.2 Posible Duración Promedio de Luz Solar - Hemisferio Norte

Latitud Norte	Enero	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
5	1.06	0.95	1.04	1.00	1.02	0.99	1.02	1.03	1.00	1.05	1.03	1.06
10	1.08	0.97	1.05	0.99	1.01	0.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
15	1.12	0.98	1.05	0.98	0.98	0.94	0.97	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
20	1.14	1.00	1.05	0.97	0.96	0.91	0.95	0.99	1.00	1.08	1.09	1.15
25	1.17	1.01	1.05	0.96	0.94	0.88	0.93	0.98	1.00	1.10	1.11	1.18
30	1.20	1.03	1.06	0.95	0.92	0.85	0.90	0.96	1.00	1.12	1.14	1.21
35	1.23	1.04	1.06	0.94	0.89	0.82	0.87	0.94	1.00	1.13	1.17	1.25
40	1.27	1.06	1.07	0.93	0.86	0.78	0.84	0.92	1.00	1.15	1.20	1.29
42	1.28	1.07	1.07	0.92	0.85	0.76	0.82	0.92	1.00	1.16	1.22	1.31
44	1.30	1.08	1.07	0.92	0.83	0.74	0.81	0.91	0.99	1.17	1.23	1.33
46	1.32	1.10	1.07	0.91	0.82	0.72	0.79	0.90	0.99	1.17	1.25	1.35
48	1.34	1.11	1.08	0.90	0.80	0.70	0.76	0.89	0.99	1.18	1.27	1.37
50	1.37	1.12	1.08	0.89	0.77	0.67	0.74	0.88	0.99	1.19	1.29	1.41

Fuente: Houston et al, 2006



Figura A.1 Coordenadas geográficas de México

Fuente: Elaboración propia con base en información del INEGI (2005).



Juan Fernando Mendoza Sánchez

DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA INCORPORACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL DISEÑO P...

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:396941113

Fecha de entrega

21 oct 2024, 12:54 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

21 oct 2024, 12:56 p.m. GMT-6

Nombre de archivo

DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA INCORPORACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN ELpdf

Tamaño de archivo

3.7 MB

93 Páginas

30,035 Palabras

157,499 Caracteres

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL	
Título del trabajo	DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA INCORPORACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL DISEÑO PAVIMENTOS	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	JUAN FERNANDO MENDOZA SANCHEZ	9101445b@umich.mx
Director	ELIA MERCEDES ALONSO GUZMÁN	elia.alonso@umich.mx
Codirector	RAFAEL SOTO ESPITIA	rsoto@umich.mx
Coordinador del programa	FRANCISCO JAVIER DOMINGUEZ MOTA	doc.ingenieria.civil@umich.mx


Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	NO	-

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	NO	-
Traducción a otra lengua	NO	-
Revisión y corrección de estilo	NO	-
Análisis de datos	NO	-
Búsqueda y organización de información	NO	-
Formateo de las referencias bibliográficas	NO	-
Generación de contenido multimedia	NO	-
Otro	NO	-

Datos del solicitante	
Nombre y firma	 / JUAN FERNANDO MENDOZA SÁNCHEZ
Lugar y fecha	MORELIA, MICHOACAN, A 15 DE OCTUBRE DEL 2024