



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

Facultad de Ingeniería Civil
Maestría en Infraestructura del Transporte
en la Rama de las Vías Terrestres

“Análisis de los efectos de la temperatura en las deflexiones de los pavimentos flexibles”

Tesis para obtener el grado de:
Maestra en Infraestructura del Transporte
en la Rama de las Vías Terrestres

Presenta:

Ing. Andrea del Pilar Salinas Acosta

Asesor:

Dr. Rafael Soto Espitia

Co-asesor:

M. I. Carlos Adolfo Coria Gutiérrez

Morelia, Michoacán, enero de 2024



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

Facultad de Ingeniería Civil
Maestría en Infraestructura del Transporte
en la Rama de las Vías Terrestres

“Análisis de los efectos de la temperatura en las deflexiones de los pavimentos flexibles”

Tesis para obtener el grado de:
Maestra en Infraestructura del Transporte
en la Rama de las Vías Terrestres

Presenta:

Ing. Andrea del Pilar Salinas Acosta

Mesa sinodal:

Asesor:

Dr. Rafael Soto Espitia

Co-asesor:

M. I. Carlos Adolfo Coria Gutiérrez

Sinodales:

Dr. Nelio Pastor Gómez

Dr. Carlos Chávez Negrete

Dr. Jorge Alarcón Ibarra

Morelia, Michoacán, enero de 2024

Resumen

La evaluación de la capacidad estructural de los pavimentos asfálticos se realiza analizando las deflexiones medidas con el deflectómetro de impacto, por sus siglas en inglés FWD (Falling Weight Deflectometer). Sin embargo, el valor de respuesta de la deflexión puede tener un incremento o decremento debido a factores climáticos como la temperatura debido a que la capa asfáltica está compuesta por un material que cambia sus propiedades mecánicas por incidencias térmicas. Es por ello que en el presente trabajo se realiza un análisis de los efectos que tiene la temperatura en las deflexiones. Esto se realiza mediante la comparación de 8 ecuaciones de ajuste lineal en donde se presenta un estudio de afectación en la corrección de la deflexión máxima por efectos de la temperatura. De la misma manera, se usó un modelo climático con el fin de estudiar el campo del gradiente térmico por medio de su perfilamiento a lo largo de la profundidad de la estructura del pavimento. Finalmente, con el procesamiento de 2467 mediciones de deflectometría correspondientes a las pruebas en los 15 tramos representativos de los corredores carreteros de México y 252 mediciones de pruebas de campo, se evidenció una poca relación a un comportamiento de ajuste lineal entre la deflexión máxima y la temperatura superficial. Por tal motivo, se propuso un comportamiento no lineal de la anterior relación y se mencionan las afectaciones que se tienen que ajustar a una linealidad de estas.

Palabras clave: Evaluación estructural, FWD, Deflexiones, Pavimento Flexible, Temperatura superficial.

Abstract

The evaluation of the structural capacity of asphalt pavements is carried out by analyzing the deflections measured with the impact deflectometer, FWD (Falling Weight Deflectometer). However, the deflection response value may increase or decrease due to climatic factors such as temperature because the asphalt layer is composed of a material that changes its mechanical properties due to thermal incidents. That is why in this work an analysis of the effects that temperature has on deflections is carried out. This is done by comparing 8 linear adjustment equations where a study of the impact on the correction of the maximum deflection due to temperature effects is presented. In the same way, a climate model is used

in order to study the thermal gradient field through its profiling along the depth of the pavement structure. Finally, with the processing of 2467 deflectometry measurements corresponding to the tests in the 15 representative sections of the highway corridors of Mexico and 252 measurements from field tests, a few relationships were evident to a linear adjustment behavior between the maximum deflection and the surface temperature. For this reason, a non-linear behavior of the previous relationship was proposed and the effects that have to be adjusted to its linearity are mentioned.

Keywords: Structural evaluation, FWD, Deflections, Flexible pavement, Surface temperature.

Agradecimientos

A mi asesor el Dr. Rafael Soto Espitia por su dedicación, conocimiento, paciencia y amistad.

A mi coasesor el M.I. Carlos Adolfo Coria Gutiérrez por su conocimiento, amistad, confianza y guía durante todo el posgrado.

A la M.A. Rosita Martínez por brindarme el apoyo e impulso desde mis estudios de licenciatura.

Al Instituto Mexicano de Transporte especialmente al M.C. Juan Fernando Mendoza Sánchez, jefe de la División de Laboratorios de Infraestructura por su buen recibimiento y gran apoyo durante mi estancia de investigación.

Al personal directivo de la Dirección General de Servicios Técnicos de la SICT por la información proporcionada para realizar los análisis de esta tesis de posgrado. En particular, al Ing. Hugo Ayala y al M.I. Vinicio Andrés Serment.

Al Dr. Joaquin Estevez por brindarme sus conocimientos durante la última etapa de la investigación.

Finalmente, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico brindado durante todo el proceso en estos estudios de posgrado.

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a mi papá Luis Humberto Salinas Gutiérrez, a mi mamá Elsa Acosta Botero y a mi hermano Daniel Esteban Salinas Acosta.

Mis papás además de ser un gran ejemplo de dedicación en la profesión de la ingeniería civil fueron los que siempre tuvieron una voz de aliento y apoyo incondicional.

Mi hermano es un gran apoyo para mí y es quien me motiva en los momentos que más lo necesito.

Contenido

Resumen	III
Abstract	III
Agradecimientos	V
Dedicatoria	VI
Lista de tablas	IX
Lista de imágenes.....	X
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2 Objetivos	3
Objetivo general:	3
Objetivos específicos:	4
1.3 Hipótesis	4
Capítulo 2. Marco teórico	5
2.1 Definición de pavimento	5
2.1.1 Pavimento flexible.....	5
2.2 Auscultación de pavimentos.....	6
2.3 Gestión de infraestructura vial	7
2.4 Evaluación funcional o superficial.....	8
2.5 Evaluación estructural	8
2.6 Deflexiones.....	9
2.7 Deflectómetro de impacto	10
2.8 Cuencas de deflexión	14
2.9 Intervalo de medición.....	15
2.10 Determinación de la condición estructural en función del valor representativo ...	15

2.11 Capacidad estructural	16
2.12 Retrocálculo	16
2.13 Factores de influencia en la determinación de deflexiones	16
2.14 Estructura del pavimento.....	17
2.15 Carga del pavimento.....	17
2.16 Factores ambientales	18
2.17 Guía de diseño de pavimentos AASHTO de 1993.....	19
2.18 Variable de temperaturas.....	19
2.19 Modelo de predicción de temperatura del pavimento asfáltico.....	20
Capítulo 3. Estado del arte.....	22
3.1 Análisis comparativo	22
3.2 Análisis experimental.....	24
3.3 Análisis con modelo de predicción del perfil de temperatura.....	26
3.4 Trabajos relacionados al estudio de la prueba de deflexión	30
3.5 Zonas geoeconómicas	32
3.6 Perfil Topográfico-Deflectométrico de los pavimentos.....	34
3.7 Procedimiento de medición de temperatura en la carpeta asfáltica	36
3.8 Delimitación de tramos homogéneos utilizados en pavimentos	37
3.9 Retrocálculo de módulos de capa de pavimento y relación de Poisson mediante minería de datos	39
3.10 Caracterización de las influencias estacionales en pavimentos asfálticos con el uso del deflectómetro de impacto.....	41
Capítulo 4. Metodología	43
Capítulo 5. Resultados.....	47
5.1 Base de datos de la Dirección General de Servicios Técnicos	47
5.2 Selección de tramos	49

5.2.1 Criterio de selección por temperatura	52
5.2.2 Zonas homogéneas	54
5.3 Análisis de ecuaciones	56
5.4 Comparativa de ecuaciones con temperatura superficial	63
5.5 Segmentación de tramos	65
5.6 Relación de temperatura superficial vs deflexión máxima	74
5.7 Análisis del comportamiento de temperatura en el pavimento	76
5.8 Análisis de temperatura de predicción vs deflexión máxima	80
5.9 Comparativo de ecuaciones con temperatura de predicción	82
5.10 Comportamiento de temperatura en el pavimento flexible	84
5.11 Comportamiento de las deflexiones en función de la temperatura	86
5.11.1 Pruebas de campo	86
5.11.2 Análisis de resultados de las pruebas de campo	91
5.12 Procedimiento con metodologías de algunos autores	101
5.13 Tratamiento de datos mediante el conjunto de datos	105
5.14 Análisis del comportamiento de deflexión máxima y temperatura superficial	108
Conclusiones	116
Futuras líneas de investigación	119
Referencias	120
Anexos	124

Lista de tablas

Tabla 1. Rangos de valores representativos para deflexiones (Fuente: SICT, 2017)	16
Tabla 2. Trabajos estado del arte (Elaboración propia, 2023)	29

Tabla 3. Tabla de modelos de predicción de temperatura (Fuente: Elaboración propia, 2023)	30
Tabla 4. Autores y variables que proponen en las fórmulas planteadas (Fuente: Liao et.al., 2019)	31
Tabla 5. Factores y porcentajes de diferencia en relación al centro (Fuente SICT, 2021)	33
Tabla 6. Tramos elegidos de manera preliminar con composición vehicular	51
Tabla 7. Tramos representativos de los 15 corredores carreteros nacionales	72
Tabla 8. Coeficientes de relación de temperatura superficial vs deflexión máxima	74
Tabla 9. Coeficientes de relación de temperatura superficial vs deflexión máxima	77
Tabla 10. Valores de propiedades de los materiales de cada capa	78
Tabla 11. Separación de datos por número de punto	92
Tabla 12. Separación de datos por número de medición	92
Tabla 13. Relación cuadrática de deflexión máxima y temperatura superficial de los 4 puntos durante los 3 días de prueba	93
Tabla 14. Hora pico de temperatura y relación cuadrática de la relación deflexión y temperatura antes y después de la hora pico	99
Tabla 15. Resultados de coeficiente del día 1	102
Tabla 16. Resultados de coeficiente del día 2	103
Tabla 17. Resultados de coeficiente del día 3	103
Tabla 18. Resultados de ecuación de ajuste y coeficiente de correlación lineal de los 3 días	105
Tabla 19. Resultado de los valores por ventana de datos del punto 1	107

Lista de imágenes

Imagen 1. Capas del pavimento asfáltico (Fuente: Udocz)	6
Imagen 2. A) Equipo Automatic Road Analyser (ARAN) y B) Deflectómetro de impacto (HWD) (Fuente: Tecnocarreteras)	7
Imagen 3. Falla superficial. Fuente (Lingen Felder, 2022)	8
Imagen 4. Elementos de la deflexión ante carga (Fuente: Beltrán- Calvo y Romo-Organista. 2014)	9

Imagen 5. Arreglo típico de los sensores de un Deflectómetro de impacto (Zárate Aquino M., Lucero Arellano M.R., 2010).....	10
Imagen 6. Sistema del FWD Dynatest (Fuente Dynatest).....	12
Imagen 7. Equipo deflectómetro de impacto (Fuente: GYA)	12
Imagen 8. Comparación de dos modelos de FWD Dynatest. (Fuente: Dynatest Consulting, Inc).....	13
Imagen 9. Foto de RWD (Fuente: FHWA)	14
Imagen 10. Esquema de una cuenca de deflexiones (Fuente: SICT, 2017)	15
Imagen 11. Estructura del pavimento (Fuente: Coria, Carlos., 2019)	17
Imagen 12. Carga impuesta y reacción de geófonos (Fuente: Borecky et al. 2019)	18
Imagen 13. Efecto corte del sensor 2 (Fuente: Rubicon Solutions, 2023)	32
Imagen 14. Zonas geoeconómicas para costos de construcción (Fuente SICT, 2021)	34
Imagen 15. Gráfico perfil topográfico- deflectométrico (Fuente: Elaboración propia, 2023)	35
Imagen 16. Gráfico perfil topográfico- deflectométrico (Fuente: Elaboración propia, 2023)	36
Imagen 17. Medición de temperatura en sección. Fuente: (Park, Buch, & Chatti, 2001)	37
Imagen 18. Delimitación de tramos homogéneos. Fuente: FHWA (2002)	38
Imagen 19. Delimitación de tramos homogéneos por diferencias acumuladas Fuente: AASHTO, 93	39
Imagen 20. Propuesta metodológica para el análisis de los efectos de la temperatura en las deflexiones de los pavimentos flexibles. Fuente: Elaboración propia, 2023.....	43
Imagen 21. Mapa de temperatura con tramos preliminares.....	53
Imagen 22. Gráfico delimitación de tramos homogéneos con criterio de deflexión del tramo Morelia - Guadalajara.....	54
Imagen 23. Gráfico delimitación tramo homogéneo Zr	55
Imagen 24. Gráfico tramos delimitados	56
Imagen 25. Presentación de ecuación propuesta por IMT. Fuente: (Pérez, Garnica, García, & Cruz, 2015).....	59

Imagen 26. Gráfico para determinación del factor de corrección de deflexiones por temperatura para pavimentos con bases hidráulicas con bases hidráulicas o estabilizadas con asfalto y/o cal. Fuente: SICT, 2017	62
Imagen 27. Gráfico para determinación del factor de corrección de deflexiones por temperatura para pavimentos con bases estabilizadas con cemento. Fuente: SICT, 2017 ...	62
Imagen 28. Gráfico de factor de ajuste de temperatura. Fuente: (Asphalt Institute, 1983)..	63
Imagen 29. Comparativa de ecuaciones con el uso de temperatura superficial del tramo Campeche - Mérida	64
Imagen 30. Mapas combinados de temperatura máxima y mínima	67
Imagen 31. Mapa geológico de México. Fuente: INEGI	68
Imagen 32. Gráfico de temperatura de las entidades federativas por mes	69
Imagen 33. Mapa de Köppen con la ubicación de los 15 tramos representativos	73
Imagen 34. Gráfico de relación deflexión vs temperatura superficial del corredor 13	75
Imagen 35. Modelo de transferencia de calor del pavimento y su ambiente que lo rodea. Fuente: (Alavi, Pouranian, & Hajj, 2014)	77
Imagen 36. Gráfico de resultado del perfil de temperatura del pavimento desde $Z=0.01$ a $Z=0.718$	79
Imagen 37. Gráfico de comportamiento de temperatura de un día con el uso del programa TEMPS	80
Imagen 38. Gráfico de relación deflexión vs temperatura de predicción del corredor 2	81
Imagen 39. Comparativo de ecuaciones con temperatura de predicción del corredor 1	82
Imagen 40. Comparativo de ecuaciones con temperatura de predicción del corredor 2	83
Imagen 41. Gráfico de comportamiento de temperatura en el pavimento flexible del tramo del corredor 1	85
Imagen 42. Comportamiento de temperatura en el pavimento flexible a profundidad superficial y a profundidad media de la carpeta asfáltica.....	86
Imagen 43. Metodología para pruebas de campo de deflectometría	87
Imagen 44. Mapa de localización del sitio de prueba.....	88
Imagen 45. Plato de carga del deflectómetro FWD apoyándose en el punto delimitado	89
Imagen 46. Sección del pavimento	90
Imagen 47. Deflectómetro de impacto en zona de prueba	91

Imagen 48. Gráfico con aproximación lineal de la relación de deflexión máxima y temperatura superficial	93
Imagen 49. Gráfico de relación deflexión máxima y presión.....	95
Imagen 50. Gráfico 1. Comportamiento de temperatura día 1	95
Imagen 51. Gráfico 2. Comportamiento de temperatura día 2	96
Imagen 52. Gráfico 3. Comportamiento de temperatura día 3	96
Imagen 53. Variación de la temperatura en un periodo de 24 h. Gráfico temperatura vs hora. Fuente: (Park et al., 2001)	97
Imagen 54. Gráfico 1. Relación lineal del punto 2 antes de la hora pico de temperatura	98
Imagen 55. Gráfico 2. Relación lineal del punto 2 después de la hora pico de temperatura	98
Imagen 56. 1. Gráfico 3D punto 1	100
Imagen 57. 2. Gráfico 3D punto 2	100
Imagen 58. 3. Gráfico 3D punto 3	100
Imagen 59. 4. Gráfico 3D punto 4	101
Imagen 60. Relación coeficiente de corrección y temperatura superficial con ajuste lineal	104
Imagen 61. Datos sin tratamiento (crudos) del punto 1	106
Imagen 62. Gráfico de ventanas de datos y segmentación de datos del punto 1	107
Imagen 63. Gráfico de resultado después del procesamiento de datos	108
Imagen 64. Gráfico en Wolfram Mathematica del conjunto de datos del punto de prueba 1	109
Imagen 65. Gráfico exponencial y comandos utilizado para gráfica exponencial	110
Imagen 66. Gráfico conjunto de datos del punto de prueba 2	111
Imagen 67. Gráfico conjunto de datos del punto de prueba 3	111
Imagen 68. Gráfico conjunto de datos del punto de prueba 4	112
Imagen 69. Programación para generar gráfico senoidal del punto 1 de prueba.....	113
Imagen 70. Gráfico resultante de la función senoidal de las pruebas de campo	114
Imagen 71. Gráfico senoidal con variación de onda partiendo del punto 0,0	114
Imagen 72. Comportamiento de los 15 tramos representativos de los corredores carreteros	115

Capítulo 1. Introducción

La evaluación de la capacidad portante de la estructura del pavimento es un índice fundamental para reflejar la resistencia que esta tiene a las cargas soportadas. Las cargas producen la deformación vertical elástica recuperable llamada deflexión del pavimento y se mide a través del equipo deflectómetro de impacto, denominado en inglés Falling Weight Deflectometer (por sus siglas, FWD). El FWD se ha convertido en uno de los principales equipos para la medición de esta propiedad debido a su análisis no destructivo y la buena simulación del estado real de deformaciones del pavimento. Su procedimiento consiste en la aplicación de una carga que genera una deformación instantánea y por medio de los sensores, se capta la deformación estructural.

La medición de deflexión es aplicable en el diseño de pavimentos, en la selección de estrategias de rehabilitación y en otras actividades de gestión de pavimentos. Sin embargo, la medición de la capacidad estructural se ve afectada durante la ejecución de la prueba por las capas superiores, especialmente la carpeta asfáltica (CA). Esta está compuesta por un tipo de material susceptible a uno de los mayores factores ambientales que afectan a los pavimentos flexibles como lo es la temperatura. La temperatura provoca que el material cambie las características viscoelásticas de la mezcla asfáltica, lo que luego conduce a la deformación del pavimento (Guo et al., 2020).

Al momento de ejecución de la prueba se toma como referencia las temperaturas del aire y del pavimento por lo cual las deflexiones tomadas a diferentes horas del día, en diferentes estaciones del año o simplemente, en un mismo tramo, a diferente cadenamiento, representará una variación de las deflexiones y módulos obtenidos por las variaciones de temperatura en el momento que se tomó la prueba. A causa de esto, opta por normalizar la temperatura del pavimento a una temperatura de referencia que sirve como semejanza para evaluar la capa de mezcla asfáltica sin la constante de temperatura.

Los métodos que proponen fórmulas de normalización no han sido los mejores ya que han dejado de contemplar muchos factores que inciden en la respuesta del pavimento además de solo considerar la temperatura superficial. Ya que parte del estudio de deformación por efectos de la temperatura es analizar los gradientes térmicos de la profundidad en la estructura

del pavimento. Por tal motivo en la investigación se estudiarán métodos para predecir la temperatura a profundidades variables, los cuales ayudan a reproducir las temperaturas que pueden presentarse en la profundidad del pavimento asfáltico.

El presente trabajo de investigación pretende mostrar un comportamiento que más se asemeje a las condiciones obtenidas en campo e incorpore posibles factores que pueden ser integrados en los efectos que tiene la temperatura en las deflexiones. Buscando reproducir una condición estructural más cercana a la que en realidad se presenta en la estructura. En este estudio se contemplarán varios tramos de operación con variabilidad de espesores y en diferentes climas del país. También se contará con información de deflectometría y estratigrafía de la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) debido a que cuentan con bases de datos georeferenciadas de bastantes tramos de la red carretera nacional.

Se reconoce la importancia de que los resultados de deflexiones sean muy apegados a las condiciones reales de campo para que sea contemplado como parte del procesamiento de datos a la hora de examinar las respuestas estructurales del pavimento asfáltico.

1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad se ha visto la necesidad de aprovechar la infraestructura existente por motivos ambientales y como medio de optimización de recursos. De esta manera, se busca recuperar las vías con el fin de llegar a condiciones iniciales de operación, seguridad y servicio que podría ofrecer una vía nueva. Es por ello, que las estrategias de conservación y sistemas de gestión de pavimentos se han vuelto una herramienta importante para determinar el proceso de mejoramiento y rehabilitación vial. Estos sistemas son la base en la toma de decisiones para proporcionar las estrategias de mantenimiento que buscan un buen nivel de servicio del pavimento para el periodo de tiempo que fue diseñado y al menor costo posible. El buen servicio se determina por su capacidad de conceder a los usuarios comodidad, seguridad y economía (Silva Balaguera et al., 2018). Sin embargo, para sugerir la conservación de la carretera se debe hacer una evaluación del pavimento en donde se valoran los parámetros estructurales como lo son el módulo resiliente, la estructura de las capas y las deflexiones; así como también superficiales como la regularidad, macrotextura y fricción. Estos parámetros prevén las intervenciones a realizar, permiten verificar el estado en el que se encuentra la superficie y su estructura, para establecer las medidas correctivas y

preventivas que lleven a un comportamiento adecuado del pavimento (Mamani Arcata & Pilco Chura, 2021).

Un estudio importante en la gestión de pavimentos son las deflexiones las cuales determina si existen deficiencias estructurales de las secciones que lo componen. Este análisis permite determinar las deficiencias antes de que se presenten en la superficie por medio de un método no destructivo del que se obtienen resultados a partir de la respuesta del pavimento. Sin embargo, realizar su procesamiento de los datos de manera errónea puede mostrar una respuesta del pavimento que no resulte confiable ni demuestre las condiciones reales, por ello, y la influencia que tiene la temperatura en la viscoelasticidad del material asfáltico se ha optado por realizar una corrección de las deflexiones bajo la incidencia de la temperatura.

Actualmente la metodología de corrección usada en México está dada en el manual propuesto por la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes en el que se hace referencia a la Guía de Diseño AASHTO 1993. No obstante, esta metodología y otras propuestas por diversos autores presentan inexactitud en los resultados debido a que además de que son calibradas en otros países y no contemplan las condiciones climáticas del país ni la estratigráfica de los pavimentos de México; su procedimiento no contempla otro factor importante a considerar en las variaciones de temperatura reflejada en la superficie, tales como los gradientes de temperatura que experimentan las capas del pavimento y las transferencias de calor en ellas, así como tampoco, otras variables importantes durante la ejecución de las pruebas en campo.

Este ajuste incorrecto de la temperatura en las deflexiones ha reflejado debilidad en la presentación de las afectaciones reales ocurridas en la superficie del pavimento, que da como resultado diseños incorrectos y propuestas de rehabilitación que no son acordes a la problemática real del pavimento.

1.2 Objetivos

Objetivo general:

Analizar la afectación de la temperatura en las capas de los pavimentos flexibles para conocer la relación con las deflexiones obtenidas mediante el deflectómetro de impacto.

Objetivos específicos:

- Analizar las variables que influyen en la temperatura para construir una metodología que reproduzca el comportamiento de los pavimentos flexibles.
- Evaluar las afectaciones directas de la temperatura en la medición de deflexiones realizadas con el deflectómetro de impacto con el fin de determinar la temperatura que afecta en la carpeta asfáltica
- Comparar los distintos métodos de ajuste por temperatura empleando datos obtenidos en campo para analizar sus resultados y las variaciones entre ellos.
- Determinar el comportamiento que mejor se ajusta a la relación de deflexiones y temperatura.

1.3 Hipótesis

Se pretende estudiar el comportamiento de la temperatura en la estructura del pavimento y los efectos que tiene en la respuesta estructural. A partir de esto, se podrá determinar un ajuste matemático que mejor represente la relación de deflexión máxima y temperatura superficial. Esta relación se llevará a cabo a través de los resultados de las deflexiones de algunos tramos carreteros realizadas con el deflectómetro de impacto y el perfilamiento de la temperatura a diferente profundidad de las capas que componen el pavimento. Con un comportamiento más apegado a condiciones de campo, se representaría de mejor manera las respuestas estructurales y se comprobaría si realmente la temperatura es el principal valor de influencia en la variación de los resultados provenientes de las mediciones de deflexión. Por lo anterior, se desarrollarían estrategias de conservación y gestión acordes a la problemática existente de la estructura del pavimento.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Definición de pavimento

Los pavimentos son una estructura vial que se construyen usualmente sobre la subrasante y están conformados por un conjunto de materiales seleccionados. El pavimento recibe las cargas del tránsito y se transmiten a los estratos o capas inferiores. Precisamente se le llama estructura, debido a que debe cumplir con una función estructural de recibir, distribuir las cargas y disipar los esfuerzos transmitidos por los vehículos.

Los pavimentos pueden ser pavimentos rígidos formados de concreto hidráulico, pavimentos flexibles los cuales están compuestos por un material asfáltico y semirrígidos o conocidos también como semiflexibles que mantienen una estructura de un pavimento flexible, pero alguna de sus capas se encuentra rigidizada. Una característica fundamental de los pavimentos es que deben ser resistentes a la intemperie, agua, darle confort y seguridad al usuario. “Las condiciones para un funcionamiento adecuado son anchura, trazo horizontal y vertical, resistencia adecuada entre el vehículo y el pavimento, en condiciones de esfuerzos destructivos del tránsito, así como también en condiciones húmedas y críticas.” (Hernández Gutiérrez, 2005).

La estructura del pavimento de manera general obedece de acuerdo a como se distribuyen las cargas. Por ello, los materiales de mayor capacidad de carga se colocarán en las capas superiores y los materiales de menor capacidad en las capas inferiores puesto que los esfuerzos se van disipando con respecto a la profundidad. Por esta misma razón y por factores económicos se determinan espesores de capas mínimos requeridos. Su resistencia no solo depende de su espesor, sino que también de los materiales que componen la capa y su adecuado proceso constructivo.

2.1.1 Pavimento flexible

Los pavimentos flexibles están constituidos por una capa de mezcla asfáltica que en ocasiones ronda un espesor de 5 a 10 centímetros, sin embargo, pueden variar de acuerdo a los esfuerzos que debe de recibir. Esta capa está construida sobre una capa de base de aproximadamente 10 a 30 centímetros de espesor “compuesta por áridos que han sido tratados o no con cemento portland, cal, asfalto u otros agentes estabilizantes” (Giordani &

Leone , 2017) . Posterior a ella, se encuentra una capa se subbase compuesta por materiales de menor calidad y por lo tanto costo que los empleados anteriormente, incluso pueden ser materiales de terreno estabilizado, el espesor de esta capa varía entre 10 a 30 centímetros dependiendo de las cargas que tenga que soportar. Las capas se muestran en la imagen 1.

Las funciones de las capas son las siguientes:

La carpeta asfáltica: Es la capa que se encuentra sometida a los esfuerzos máximos y condiciones más severas impuestas por el clima y el tráfico.

La capa de base: Soportar las cargas aplicadas y distribuye estas cargas a la subbase o al terreno.

La capa de subbase: Transmite cargas al terreno y en algunos casos puede actuar de colaborador del drenaje de las aguas del subsuelo (Giordani & Leone , 2017)

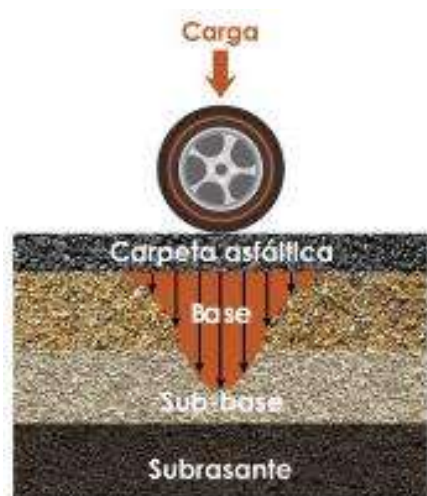


Imagen 1. Capas del pavimento asfáltico (Fuente: Udocz)

2.2 Auscultación de pavimentos

Mediante el análisis de auscultación se puede clasificar y evaluar las redes viales para ver la calidad de servicio que estas brindan a los usuarios que la operan. Esta evaluación permite determinar cuándo realizar un mantenimiento preventivo o correctivo. De esta manera, se determinan las inversiones requeridas para conservarla en buen estado de operación, así como también se definen las prioridades de atención y la programación de los trabajos por ejecutar. La auscultación de pavimentos es aplicada a un tramo específico de carretera y se realiza con

equipos de alto rendimiento para obtener información sobre la calidad de los materiales subyacentes a la superficie y el comportamiento del pavimento. (Espinoza Romo, 2018). Con ello, se pretende optimizar recursos durante la administración de carreteras y autopistas, determinando las condiciones de servicio y estructurales que ofrece un pavimento nuevo o existente en cuanto a su construcción, conservación, ampliación, rehabilitación y modernización de caminos en operación. Este análisis se puede hacer por medios destructivos y no destructivos. Sin embargo, las tecnologías van en caminadas a los análisis no destructivos debido a su efectividad y ahorro en costos.

En la imagen 2 se presentan dos equipos de alto desempeño para realizar la auscultación de pavimentos.



Imagen 2. A) Equipo Automatic Road Analyser (ARAN) y B) Deflectómetro de impacto (HWD) (Fuente: Tecnocarreteras)

2.3 Gestión de infraestructura vial

Los análisis de auscultación de carreteras también son una parte fundamental en la gestión de infraestructura vial puesto que se debe tener un inventario de los daños sobre la red vial. Para ello es necesario automatizar algunos procesos para hacer más eficiente la recopilación y gestión de información de campo. Los equipos de alto rendimiento, la inspección visual eficiente, agencias como el IRAP (International Road Assessment Program), emplean una metodología que hace parte de esta gestión. En caso de no existir estas metodologías existe el riesgo de formular planes de conservación poco eficientes (Macea Mercado et al., 2022).

La importancia de mantener en buen estado la infraestructura vial es evitar sobre costos de operación en el transporte. Un país que permite el deterioro de su infraestructura tiene sobre costos de operación vehicular que ronda entre 1% y 3% de su producto interno bruto nacional (Bull, 2003). La manifestación de deterioros sobre la superficie de rodadura afecta negativamente la seguridad de circulación vehicular, la hace menos confortable e incrementa costos de operación. Por tal motivo, diversas organizaciones, entidades gubernamentales e investigadores han centrado su atención en la gestión de pavimentos y algunos otros procedimientos que apoyen en un buen desarrollo de la infraestructura vial.

2.4 Evaluación funcional o superficial

Evalúa las fallas que comprenden la superficie de rodamiento debido a fallas de la capa superior, estas pueden ser propias del pavimento como la regularidad superficial, permeabilidad, agrietamiento de la capa, grietas, pulimiento de agregados, roderas, baches superficiales, entre otros o funcionales como reflexión y ruido por el paso del tráfico.

Un ejemplo de falla superficial son las grietas transversales presentadas en la imagen 3.



Imagen 3. Falla superficial. Fuente (Lingen Felder, 2022)

Su metodología de evaluación se realiza mediante indicadores de desempeño, verificaciones de entorno e inventario de deterioros (Cortés, 2019).

2.5 Evaluación estructural

La evaluación estructural de pavimentos consiste en determinar la capacidad portante de una estructura vial existente desde su subrasante hasta la capa superficial, esta capacidad portante

se determina en cualquier momento de su vida de servicio. Las necesidades de evaluar estructuralmente los pavimentos de una red aumentan cuando surge la importancia de preservar y rehabilitar la red vial (Hoffman & Del Aguila , 1985). Por medio del parámetro de evaluación estructural se registran datos como la vida útil o la capacidad con la que cuenta el pavimento para soportar las cargas de tránsito por un cierto periodo de tiempo puesto que involucra la determinación de la aptitud de un pavimento para soportar el tránsito vehicular cotidiano sin presentar deformaciones acumuladas grandes tanto en la condición presente como en su vida de servicio futura.

2.6 Deflexiones

Según la normativa de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) (2017) N·CSV·CAR·1·03·010/17 la deflexión es la medida de deformación elástica o de recuperación vertical que experimenta un pavimento al paso de una carga en la superficie. Esta respuesta depende tanto del tipo y estado del pavimento como del método o equipo de medición, así como de factores ambientales tales como la temperatura y humedad. Su primordial importancia es evaluar la capacidad de transferencia de carga de un pavimento, la forma y magnitud en que este se deforma para determinar la rigidez estructural tanto de una capa del pavimento como sus módulos resilientes. En la imagen 4 se observan todos los elementos integrados en la deflexión ocasionada por una carga.

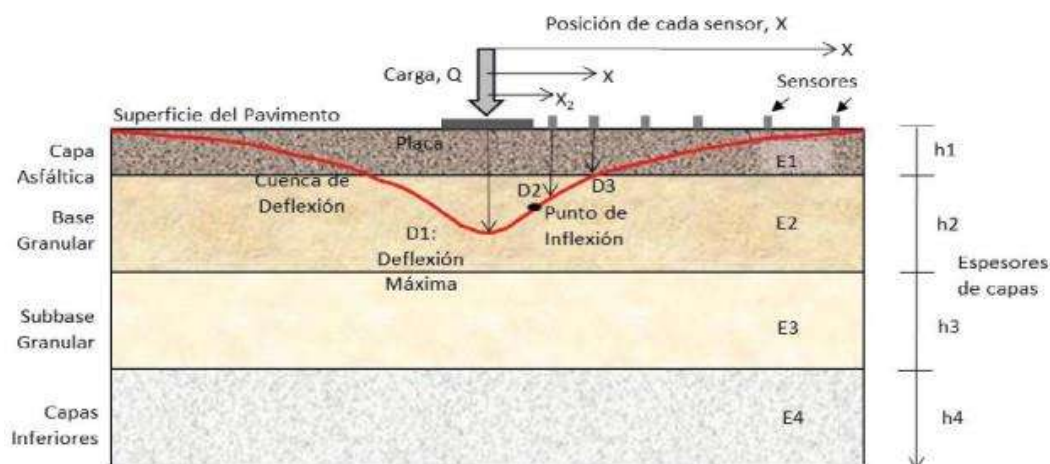


Imagen 4. Elementos de la deflexión ante carga (Fuente: Beltrán- Calvo y Romo-Organista. 2014)

Existen gran cantidad de equipos para determinar las deflexiones que varían dependiendo de su posición de medición, número de sensores y formas de aplicación de las cargas. Los

equipos comúnmente usados y descritos en la normativa actual son no destructivos, es decir no causarán daño a la estructura del pavimento cuando es efectuada la prueba. Sin embargo, el de mayor uso son los deflectómetros de impacto, estos equipos aplican una sollicitación al pavimento por impacto y determinan una cuenca de deformaciones a partir de datos de desplazamiento, obtenidos por un arreglo de sensores de desplazamiento.

2.7 Deflectómetro de impacto

El manual de la SICT (2017) para la Determinación de las Deflexiones con Equipo de Impacto en Pavimentos Flexibles M·MMP·4·07·020/17 indica que este equipo genera la carga mediante la caída libre de un plato de masa y altura variables que ayuda a la distribución uniforme de la carga sobre la superficie. Con la ayuda de los 7 sensores o en algunos casos según lo requiera 9 sensores de deflexión se obtiene la cuenca resultante de la aplicación de la carga, cada sensor tiene un rango de medición mínimo de 0 a 2200 μm , con una resolución mínima de 0,1 μm para estimar el desplazamiento vertical máximo. Su posición es a nivel de la superficie del pavimento al momento de ejecutar la prueba y sus posiciones típicas pueden ser las mostradas en la imagen 5.

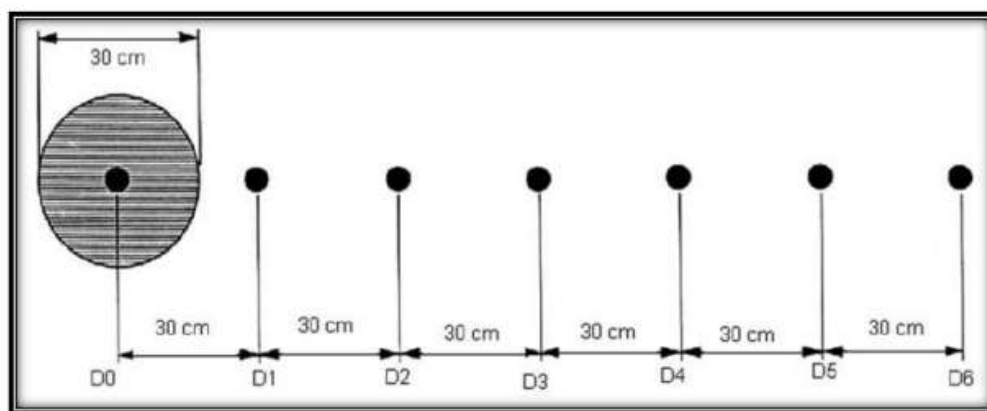


Imagen 5. Arreglo típico de los sensores de un Deflectómetro de impacto (Zárate Aquino M., Lucero Arellano M.R., 2010)

De la misma manera, cuenta con un aditamento para la medición de la carga aplicada (celda de carga) debajo del centro de la placa. Esta placa en el falling weight deflectometer (FWD) mide 300 mm de radio una superficie similar al área de contacto de un neumático. La placa tiene un rango de medición mínimo de 5 y máximo de 120 kN, esto de acuerdo con la

capacidad del dispositivo para generar la fuerza. La celda de carga es resistente al agua y al golpe contra el pavimento que va a ejercer para las mediciones.

La recopilación de datos se realiza mediante un conjunto de componentes electrónicos y de cómputo que permiten tanto la operación y control total del deflectómetro. El permite adquirir y manejar los datos del historial del tiempo de impulso de carga, las deflexiones obtenidas, mediciones de temperatura, la medición del sistema de posicionamiento global (GPS) además de poder controlar diversas funciones mecánicas y de calibración durante las pruebas.

Además, como la capacidad estructural está fuertemente influenciada por la temperatura ambiente y del pavimento, como se mencionó anteriormente el deflectómetro cuenta con medición de temperatura a través de dos aditamentos de temperatura los cuales se encuentran ubicados cercanos a la celda de carga. El sensor de temperatura del aire tipo RTD (detector de temperatura por resistencia) y de la superficie del pavimento (pirómetros) ubicado cerca a la celda de carga punteado hacia el pavimento con el fin de medir en cada punto de medición de deflexión.

La norma ASTM D-4694-96 indica que los componentes básicos de un FWD son: Chatti et al. (2017)

- Celda de carga: El FWD libera pesos variables conocidos desde una altura dada sobre una placa de carga apoyada sobre el pavimento, produciendo una carga sobre el pavimento que es similar en magnitud y duración a la de una carga de rueda en movimiento.
- Transductor de desplazamiento variable lineal (LVDT), geófonos y acelerómetros: Son una serie de sensores están ubicados a distancias fijas de la placa de carga, de modo que se mida la deflexión. La distancia entre sensores depende de la superficie del pavimento que se está probando y el número de sensores en el FWD.
- Medidores de temperatura infrarrojos: temperatura del pavimento, temperatura del aire, temperatura de la superficie.
- Medición electrónica de distancias.
- Unidad de control/adquisición de datos.

El sistema del FWD se muestra en la imagen 6 descrita a continuación:

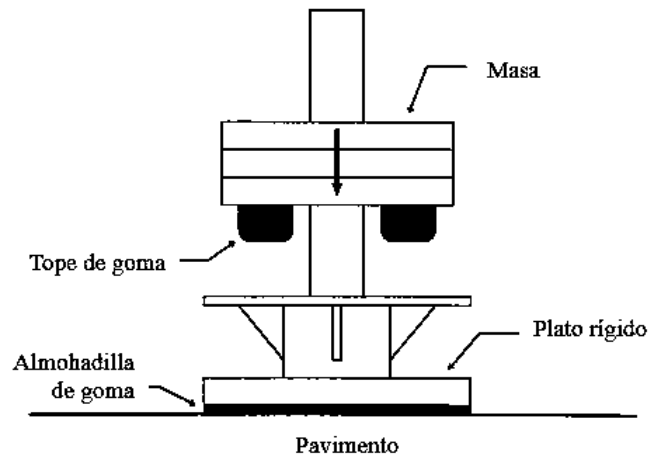


Imagen 6. Sistema del FWD Dynatest (Fuente Dynatest)

La representación del deflectómetro de impacto transportado como tráiler de un vehículo tractor es el siguiente mostrado en la imagen 7:

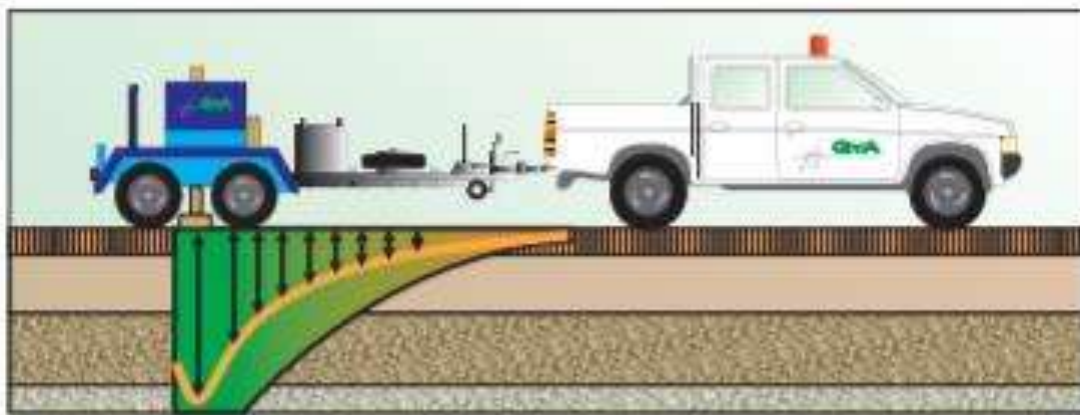


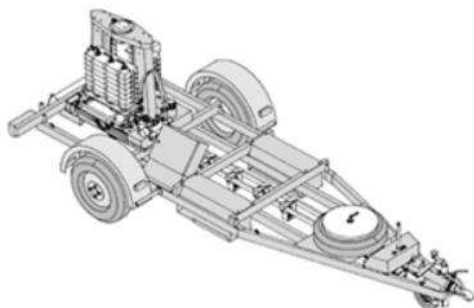
Imagen 7. Equipo deflectómetro de impacto (Fuente: GYA)

Mediante la prueba de deflectometría, con el uso del deflectómetro de impacto se obtienen: Los módulos de elasticidad de cada capa, la rigidez de la estructura del pavimento, el módulo de reacción de la subrasante, la capacidad estructural del pavimento y, el análisis y diseño de rehabilitación estructural del pavimento, así como la vida remanente del mismo.

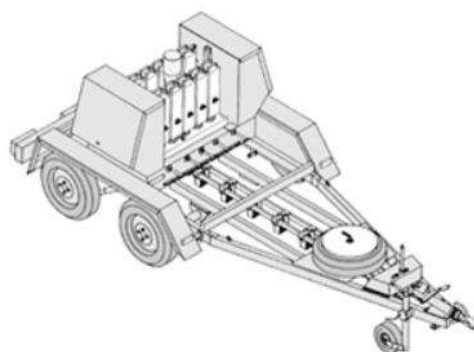
Actualmente existen diversos fabricantes de deflectómetros de impacto. Sin embargo, los más usados son: Chatti et al. (2017)

Dynatest

Esta marca tiene sus instalaciones de fabricación en Dinamarca y Estados Unidos. Cuenta con dos tipos de deflectómetros, el 8000 correspondiente al FWD y el 8002 que es HWD mostrados en la imagen 8. El modelo 8000 admite masas de caída de 110 a 770 lb, mientras que el 8082 soporta masas de caída de 441 a 1,543 lb. Con el deflectómetro de Dynatest se pueden utilizar dos tamaños de platos: De 11.8 pulgadas (300 mm) utilizada comúnmente para pavimentos o de 17.7 pulgadas (450 mm) más comúnmente utilizada para aeropuertos.



Dynatest® Model 8000 Falling Weight Deflectometer



Dynatest® Model 8082 Heavy Weight Deflectometer

Imagen 8. Comparación de dos modelos de FWD Dynatest. (Fuente: Dynatest Consulting, Inc)

JILS

Es una empresa sueca de manufactura de deflectómetros que produce tres sistemas de FWD: JILS-20, JILS-20HF y JILS-20T con radar de penetración terrestre (GPR). El JILS-20 es el FWD más común, el cual está montado en un remolque de doble eje. Al igual que los Dynatest® FWD, el sistema incluye una placa de carga de 12 pulgadas (305 mm), DMI, hardware de medición de temperatura y un sistema de monitoreo de video.

En la actualidad se comienza a hablar de otros tipos de deflectómetros más eficientes por su rapidez de prueba y más seguros. Sin embargo, estos aún no son implementados en México, pero si en Estados Unidos. Uno de ellos es el Rolling Wheel Deflectometer (RWD) para mediciones de alta velocidad de la respuesta estructural del pavimento (ver imagen 9). En 2002, un estudio de prueba mostró que el dispositivo podría medir con éxito las desviaciones del pavimento a velocidades de autopista. Pues este dispositivo es capaz de medir la respuesta estructural desde 10 mph a 60 mph (16 km/h a los 96 km/h) Douglas et al. (2020). En Estados Unidos es muy usado debido a su gran extensión de carreteras y de la eficiencia que tiene este equipo midiendo esta condición del pavimento, además de lo que se mencionó anteriormente de la seguridad pues al ser un vehículo tiene las precauciones frente a una parada a realizar pruebas.



Imagen 9. Foto de RWD (Fuente: FHWA)

2.8 Cuencas de deflexión

Las cuencas de deflexión describen la deformación elástica de la superficie del pavimento medida a distancias variables con respecto al punto de aplicación de la carga. Estas cargas pueden ser dinámicas o estáticas.

Las mediciones en los distintos sensores determinan la forma de la cuenca de deflexiones que puede usarse para estimar las propiedades de los materiales de una estructura de pavimento. El material viscoelástico hace que su comportamiento se torne elástico ante las velocidades de aplicación de carga rápida y plástico o viscoso en velocidades bajas de aplicación de carga. Lo cual se ve reflejado en el cuenco de deflexiones y a partir de ello poder calcular la capacidad estructural de un pavimento para prever sus necesidades de refuerzo si son secciones que son estructuralmente uniformes, así como de aquellas secciones débiles y/o deterioradas (SICT, 2017). Ver imagen 10.

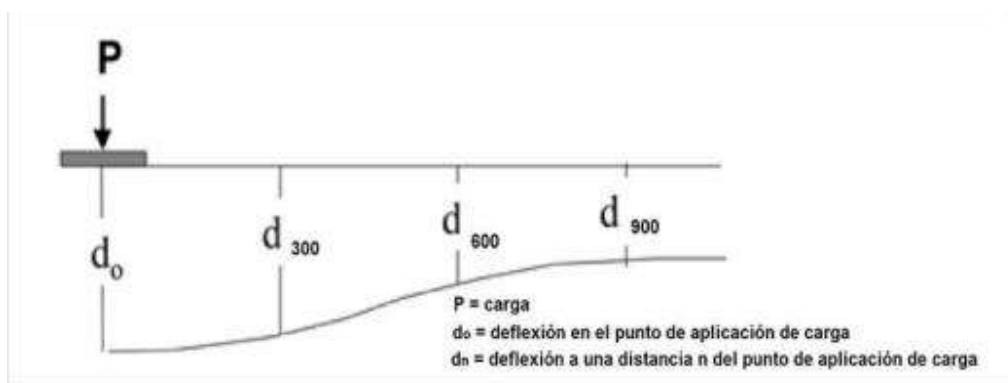


Imagen 10. Esquema de una cuenca de deflexiones (Fuente: SICT, 2017)

2.9 Intervalo de medición

El intervalo de medición para determinar las deflexiones es la distancia que hay entre un punto de medición de deflexión y el que le sigue. Las longitudes de intervalo son constantes, no debe tener mucha variabilidad. Como mínimo se define un intervalo de 100 metros y máximo de 500 metros (SICT, 2017). Usualmente se trabajan a 250 metros, pero depende de lo establecido por el cliente en los términos de referencia.

2.10 Determinación de la condición estructural en función del valor representativo

Después de normalizar la deflexión de acuerdo a los parámetros necesarios ya sea temperatura y/o carga se establece la condición estructural de cada tramo carretero. Los rangos de valores representativos de deflexiones para la clasificación de los segmentos carreteros normalizados a 700 Kilopascales y 20 grados Celsius se presentan en la siguiente tabla especificada en la normativa de conservación N·CSV·CAR·1·03·010/17 (SICT, 2017):

Tabla 1. Rangos de valores representativos para deflexiones (Fuente: SICT, 2017)

Rangos de valores representativos de deflexiones mm		
Condición estructural	Autopistas y Corredores Carreteros	Red Básica y Secundaria
Buena	0 a 0,4	0 a 0,50
Regular	-	> 0,50 y ≤ 0,80
Mala	> 0,4	> 0,80

2.11 Capacidad estructural

La capacidad estructural se puede determinar mediante pruebas no destructivas debido a que con las deflexiones y espesores obtenidos de la interpretación del cuenco de deflexiones y con la técnica de retrocálculo se obtienen los módulos de elasticidad de las diferentes capas que componen el modelo estructural de un pavimento en servicio. El uso de metodologías de diseño de pavimentos como la AASHTO 1993 permite realizar el análisis estructural del pavimento (Higuera Sandoval, 2009).

2.12 Retrocálculo

El uso más común que se le da a los datos generados por el deflectómetro es en el retrocálculo. En el proceso de retrocálculo, las deflexiones del pavimento se determinan utilizando la teoría elástica de la capa, el espesor de la capa y los módulos de capa supuestos (p. ej., capa de mezcla asfáltica, base y subrasante). Se utiliza un enfoque iterativo para variar los módulos de capa hasta que la cuenca de deflexión calculada coincida con la cuenca de deflexión medida por el deflectómetro (Federal Highway Administration Research and Technology (FHWA), 2017). Este proceso se realiza con la finalidad de saber con precisión los módulos de elasticidad de cada capa, los espesores de capa sin necesidad de realizar calas y poder observar un aproximado de la situación actual del pavimento contra la de diseño y estimar su vida remanente.

2.13 Factores de influencia en la determinación de deflexiones

Los factores que intervienen en las deflexiones del pavimento son: La estructura del pavimento (tipo y espesor), carga del pavimento (magnitud de la carga y tipo de carga) y factores ambientales (temperatura, efectos estacionales y humedad del sistema).

2.14 Estructura del pavimento

La deflexión representa la respuesta del sistema de las capas que conforman la estructura del pavimento, estas pueden ser subbase, base y superficie. Los parámetros de espesor y rigidez tanto de la capa superficial como de las capas de soporte afectan la magnitud de las deflexiones medidas. Un sistema débil responde de menor manera a comparación que un sistema fuerte, ante la misma carga aplicada. Otros factores que influyen dentro de esta categoría son las variaciones en los parámetros de la subrasante y la presencia de capas rígidas subyacentes debido a la composición de la capa del suelo natural. Ver imagen 11 correspondiente a una ilustración de las capas que componen la estructura asfáltica.

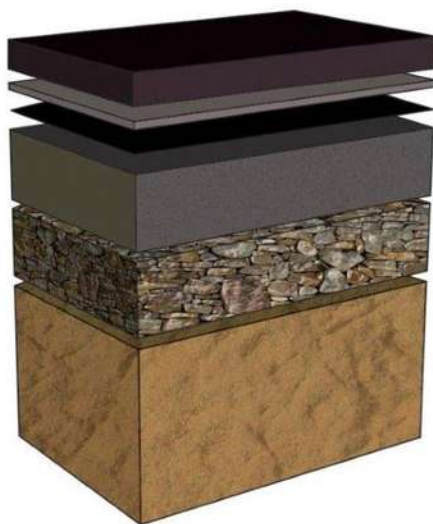


Imagen 11. Estructura del pavimento (Fuente: Coria, Carlos., 2019)

2.15 Carga del pavimento

La magnitud de la carga aplicada afecta en gran medida debido a que no es constante en todas las mediciones por el equipo de medición. Algunos equipos pueden imponer cargas desde los 13 kN a los 245 kN, por lo que es importante determinar y normalizar el nivel de carga adecuado para la aplicación. El tipo de carga también afecta la deflexión de un pavimento puesto que se producen respuestas diferentes en condiciones de carga estáticas, dinámicas o por impacto, así como también varía el valor de deflexión de acuerdo al nivel de carga. Ver imagen 12.

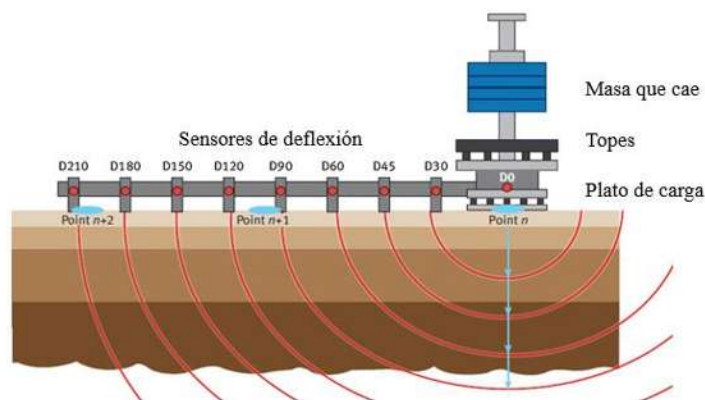


Imagen 12. Carga impuesta y reacción de geófonos (Fuente: Borecky et al. 2019)

2.16 Factores ambientales

La temperatura y el contenido de humedad de las capas del pavimento afectan en gran medida los valores de deflexión de la estructura del pavimento. Por una parte, la humedad afecta las mediciones de deflexiones debido a su influencia en las capas inferiores del pavimento. Por ejemplo, el módulo de la base granular no varía significativamente a lo largo de un día, su variación se produce por los cambios estacionales llegando a modificaciones del módulo elástico de $\pm 18\%$ por factores de humedad (Ramos García, 2015). Para reducir los efectos causados por la humedad se realizan las pruebas de deflexión el mismo día o 3 días después del fenómeno de lluvia con el fin de evitar condiciones saturadas que reducen el soporte del pavimento principalmente de las capas granulares.

Sin embargo, la temperatura es el factor más importante que debe ser considerado como parte de cualquier programa de pruebas de deflexión puesto que las propiedades de los materiales de cada capa se ven alterados por la temperatura como su viscosidad, plasticidad y rigidez (Zheng et al., 2019). Como las mediciones realizadas con el deflectómetro de impacto (FWD) se realizan a diferentes temperaturas, para iguales condiciones de carga se tendrán valores diferentes de deflexión debido a la variación de temperatura. Especialmente, la mezcla asfáltica se compone por materiales sensibles a la temperatura en los cuales sus propiedades cambian debido a su comportamiento viscoelástico, así como su rendimiento se altera por acciones de la temperatura. El análisis de las deflexiones y la variabilidad de temperatura permite ver como la respuesta del pavimento ante cargas de tráfico será variable a diferentes temperaturas.

Las variaciones de rigideces de la capa asfáltica de acuerdo a los cambios térmicos hacen necesaria la normalización de deflexiones a una temperatura de referencia. Por este motivo, se requiere de la corrección de las deflexiones medidas, puesto que permite realizar interpretaciones significativas de los datos obtenidos. En pavimentos flexibles se han desarrollado métodos de normalización de deflexiones que consisten en la corrección de la deflexión máxima.

2.17 Guía de diseño de pavimentos AASHTO de 1993

Las mediciones de deflexiones deben corregirse a un conjunto estándar de condiciones ambientales para utilizar en el análisis de diseño. Como se mencionó anteriormente, el factor medioambiental más importante que afecta a las deflexiones superficiales de los pavimentos flexibles es la temperatura de las capas asfálticas, es por ello que la Guía AASHTO 1993 presenta la corrección por temperatura de las deflexiones efectuadas con el FWD por medio de gráficos para la determinación del factor de corrección de deflexiones por temperatura para pavimentos asfálticos.

2.18 Variable de temperaturas

2.18.1 Temperatura superficial del pavimento

La temperatura superficial del pavimento es fundamental para el rendimiento y comportamiento de los pavimentos. Por este motivo el FWD trae un aditamento que permite la toma de la temperatura al momento de ejecutar la prueba. Actualmente esta es la temperatura que se toma como efectiva para la corrección de la temperatura en las deflexiones bajo la Guía AASHTO 1993. Las variaciones de la temperatura superficial del pavimento se estiman en función de la temperatura del aire local, la profundidad del pavimento, la latitud y otros coeficientes empíricos regresados (Qin, 2016).

2.18.2 Temperatura del aire del pavimento

La temperatura del aire circundante controla la convección de calor en la superficie y afecta en gran medida la temperatura de la superficie y sus distribuciones a lo largo de la profundidad. Junto con otras condiciones climáticas como son la velocidad del viento y la radiación solar hacen que se refleje en la temperatura de la superficie (Qin & Hiller, 2011).

2.18.3 Temperatura efectiva

La temperatura efectiva de la superficie del pavimento es la temperatura media de la capa de carpeta asfáltica la cual esta influenciada tanto por la temperatura de la superficie como con la temperatura que tienen las capas subyacentes. Esta temperatura tiene un efecto significativo por los efectos del gradiente de temperatura debido a los ciclos diurnos de calentamiento y enfriamiento, los cuales impactan el módulo de carpeta asfáltica y la deflexión de la superficie. Es debida a la energía recibida en forma de radiación solar. (Park et al., 2001). Otras temperaturas que pueden tener relación, es la temperatura máxima y mínima del pavimento, pues son las temperaturas extremas que se pueden ver durante un ciclo de tiempo reflejadas en la superficie del pavimento.

2.19 Modelo de predicción de temperatura del pavimento asfáltico

Para referenciar los factores de corrección a una temperatura real del pavimento se necesita determinar la temperatura efectiva de la capa de carpeta asfáltica. Es por ello, que se opta por predecir el perfil y el historial de temperatura del pavimento en el momento que se realiza el cálculo de la respuesta del pavimento. El perfilamiento de la temperatura ayuda a determinar el comportamiento futuro que tendrá el balance de energía térmica, tomando en cuenta las energías térmicas entrantes y salientes, además del calor disipado a través de las capas de la estructura (Alavi et al., 2014). En los modelos de predicción es importante la variabilidad en las propiedades térmicas de los materiales en una estructura de pavimento multicapa en el cual se hace un análisis más completo de las ecuaciones de balance de calor para la superficie del pavimento y las capas subyacentes.

Algunos mecanismos de transferencia de calor que afectan al pavimento considerados en modelos son:

2.19.1 Radiación solar

El flujo de calor por radiación solar es la radiación neta absorbida por la superficie del pavimento. Depende de la incidencia de la radiación solar global sujeta a la latitud y ángulo de incidencia entre la superficie del pavimento y los rayos del sol en el ciclo diurno y, el albedo (reflectividad de la superficie).

2.19.2 Radiación infrarroja térmica

Es la radiación térmica de ondas de la atmósfera a la superficie del pavimento y viceversa. Su cálculo se hace mediante el coeficiente de absorción de la superficie del pavimento, la emisividad de la superficie y finalmente, las temperaturas de superficie y aire.

2.19.3 Convección

En los pavimentos la convección ocurre cuando la transmisión de calor se mueve sobre la superficie, por consiguiente, el enfriamiento de la superficie del pavimento ocurre principalmente por convección entre la superficie y la atmósfera. Este va en función de un coeficiente por convección y las temperaturas del aire y superficie del pavimento.

2.19.4 Conducción

La conducción de calor dentro de la superficie superior y las capas del pavimento siguen las leyes de conductividad térmica de los materiales y la profundidad de la estructura del pavimento. Este mecanismo también implica el equilibrio térmico de los materiales dados sus espesores.

Capítulo 3. Estado del arte

Algunos autores han comenzado por hacer una recolección de fórmulas de la bibliografía existente en búsqueda de la normalización de las deflexiones por efectos de la temperatura, analizando el tipo de criterio usado en cada una, para a partir de ello, plantear una fórmula o hacer ajustes a las ya existentes. Varios autores han dedicado sus investigaciones a proponer un factor de corrección (FC) bajo formulaciones simples. Ejemplo de ello es la ecuación 1, donde el FC se describe como el cociente de la deflexión a una temperatura de referencia, entre la deflexión a una temperatura del sensor n.

$$FC = \frac{D_{Tref}}{D_T} \quad (1)$$

D Tref: Deflexión a temperatura de referencia

D T: Deflexión a temperatura de prueba

Se emplean diferentes tipos de enfoque como el análisis de regresión y el análisis comparativo con el propósito de estudiar los factores propuestos que llevan al surgimiento de las fórmulas. Aunque algunos métodos buscan un factor de corrección estandarizado, otros incorporan diferentes temperaturas de referencia, métodos de muestreo y métodos de validación, entre otros.

Pero este primer acercamiento tiene cuestionamientos como la elección de la temperatura de referencia y las influencias que tiene la temperatura a lo largo de los sensores de medición del FWD. Para la normalización se deben tener en cuenta diversos factores que involucran el proceso de la prueba y los resultados obtenidos de la deflexión. Por todo lo anterior, hacer una revisión de aquellas investigaciones es indispensable en el proceso. Se deben analizar cuantitativamente las variables que influyen en la temperatura de las capas de los pavimentos flexibles para conocer la relación con las deflexiones obtenidas mediante el deflectómetro de impacto y poder construir un método que ajuste las temperaturas al momento de realizar la deflexión.

3.1 Análisis comparativo

Pérez et al. (2015) Realizan una investigación comparativa de las fórmulas de la AASHTO, Instituto del Asfalto, Cedex, Universidad Católica de Chile y Mopt corrigiendo las

temperaturas de prueba mínimas registradas (11.15°C) y la máxima (30°C). Se llevaron a cabo pruebas de deflexiones con el deflectómetro de impacto para diferentes horas, durante el mismo día de prueba en la pista del Instituto Mexicano del Transporte. Posteriormente, la metodología usada por ellos esta desarrollada para solo un tipo de estructura de pavimento asfáltico y sin espesor de carpeta variable. Mediante el uso de gráficas se compara cuantitativamente las fórmulas mencionadas anteriormente. A partir de ello, se observa que algunas metodologías, corrigen en exceso, es decir las deflexiones corregidas resultan mayores que las de referencia (a 20°C). Este artículo de investigación demuestra la necesidad de corrección de las deflexiones por efectos de la temperatura en la carpeta de rodamiento, y la necesidad de contar con una metodología de corrección que sea adecuada a las condiciones de los pavimentos del país.

Con la misma metodología de análisis comparativo, García & Castro (2011) mediante 7 pruebas de deflexión ejecutadas con el curvímeter el mismo día, desarrollaron un factor de ajuste para pavimentos flexibles compuestos por 250mm de mezcla asfáltica en un rango de temperatura de asfalto representativo de prueba entre 15° y 25 ° Celsius. La comparación de las fórmulas existentes se hizo mediante una prueba de significancia bajo el test de Shapiro-Wilk usado para contrastar la normalidad del conjunto de datos. A pesar de haber usado un dispositivo de medición diferente a las demás logra comparar los estudios experimentales y los que se han obtenido a partir de análisis teórico. Estos autores estudiaron el factor de temperatura que fue establecido por cada fórmula y la temperatura de referencia a la que fue creada para observar la influencia. Como método de validación de la metodología propuesta se modelaron las deflexiones medidas a temperatura variable usando un sistema multicapa. El factor de corrección obtenido es descrito en la ecuación 2:

$$FC = \frac{Dt_{ref}}{Dt} \quad (2)$$

FC: Es el factor de corrección

Dtref: Es la deflexión máxima a una temperatura de referencia

Dt: Es la deflexión máxima a una temperatura de prueba

3.2 Análisis experimental

El módulo de rigidez de las capas determina tanto las deformaciones elásticas como no elásticas, este es un parámetro que no se podría relacionar directamente por el deflectómetro de impacto debido a que las deformaciones del deflectómetro son elásticas y lineales, dadas por fuerzas normales a la superficie y no actuantes sobre la misma. Por tal motivo, Pais et al. (2020) no pudo desarrollar una ecuación de ajuste mediante el estudio mecanicista su metodología consistió en examinar el módulo de rigidez obtenido de laboratorio a una temperatura de referencia y bajo la ley de variación de rigidez con la temperatura. Creó un modelo de ajuste considerando los parámetros de módulo de rigidez de la mezcla asfáltica, la base granular y la subrasante, así como también contemplan los espesores de las capas, la distancia entre el sensor y la carga. Finalmente, como validación del modelo se hace la aplicación en campo.

Por otra parte, Park et al. (2001) consiguen mediante el método de regresión numérica, aproximar la relación de la variable de temperatura del pavimento y las deflexiones medidas. Este es un método común debido a que la temperatura de referencia se relaciona con la temperatura media efectiva para encontrar la temperatura a la cuál debe ser referenciada. A partir de esto, se vuelve a hacer el mismo análisis entre las deflexiones medidas a una temperatura t y la temperatura de referencia. El factor de corrección determinado es para la corrección del módulo retrocalculado de la capa asfáltica y es dado por la pendiente del ajuste de temperatura y el logaritmo de la relación entre temperatura media. En este artículo se contempla la temperatura de referencia a 25°C y se obtiene la temperatura media de la carpeta asfáltica de la sección transversal del pavimento analizado. Las variables consideradas son el módulo de la capa, el ciclo de calentamiento y enfriamiento, la temperatura a profundidad variable y el tiempo de prueba del FWD.

La temperatura media de la capa asfáltica de manera experimental se obtiene a través de la instalación de tramos instrumentados con la instalación de termopares a diferentes profundidades de la estructura del pavimento, por lo que se tiene que hacer una perforación para su instalación. Esto sirve como medio de validación para monitorear constantemente la temperatura en los modelos desarrollados y los factores de ajuste con respecto a la temperatura. Zheng et al. (2019) instalan estos dispositivos para el monitoreo de la

temperatura a 20, 35, 70 y 250 mm de profundidad en 3 tramos de prueba compuestos por pavimentos semirrígidos, con ello se contemplan los gradientes de temperaturas a lo largo de las capas y se determinan fórmulas de temperatura en ciclos de enfriamiento y calentamiento a h profundidad a partir del factor de ajuste mencionado anteriormente. La fórmula creada para describir el comportamiento de temperatura es la ecuación 3 en la cual sus principales variables son espesor del pavimento asfáltico (h) y la temperatura superficial media de las 5 horas anteriores en el momento de la prueba de FWD en °C (T_o):

$$T_{average} = (-2.65 + 0.52h) + (0.62 - 0.008h)T_o \quad (3)$$

De la misma manera, Chen et al. (2000) obtienen la temperatura media del pavimento, sin embargo, ellos determinan su ecuación de ajuste para los dos primeros sensores por medio de la misma metodología que se ha venido discutiendo de regresión lineal. Al igual que Park, et al. para el factor de corrección se toma como temperatura de referencia una temperatura de 25°C debido a las condiciones climáticas de los tres sitios de prueba ubicados en Texas, las cuales suelen ser más cálidas que tomando una temperatura estándar de 20°C, a partir de ellos se determina la ecuación de ajuste integrando los dos primeros sensores del equipo para las 3 zonas.

Straube & Jansen (2009) determinaron la temperatura de la carpeta asfáltica a los 5 cm de su espesor como temperatura efectiva; además de la temperatura consideran la posición de cada geófono. Como método experimental se instalaron termopares en 2 tramos a lo largo del espesor de la capa asfáltica y se monitorearon durante un año, a medida que transcurría el tiempo se hacían mediciones con el FWD al igual que en las diferentes estaciones del año para ver la variabilidad con respecto a los cambios de temperatura del sistema circundante.

La propuesta de fórmula planteada por estos autores la ecuación 4:

$$D_{20,i} = (a - b * T) * DT_{,i} \quad (4)$$

$D_{20,i}$ = Deflexión del geófono i a 20°C

a,b= Factores dependiendo de la posición del geófono y el espesor de la carpeta asfáltica

T= Temperatura de la carpeta asfáltica a 5 cm

$DT_{,i}$ = Deflexión medida con el FWD a una temperatura T de la capa de CA del geófono i

Otro artículo que considera la distancia de los sensores del FWD es Březina et al. (2022) quien plantea una ecuación de corrección para cada sensor de deflexión haciendo énfasis que a partir del sensor W5 (900mm) no se toma en cuenta el factor de temperatura. Para encontrar el coeficiente, se graficó las deflexiones medidas por los sensores en 10 tramos de prueba de diferente composición de estructura del pavimento contra la temperatura de prueba. A partir de la obtención del coeficiente, estos autores hicieron una fórmula de corrección para el módulo retrocalculado y para las deflexiones para finalmente, ver cuál de los dos parámetros se veían más afectados por las temperaturas variables. Mediante la curva de análisis de regresión, se deriva la fórmula general de corrección donde se contempla como variables principales la deflexión medida a una temperatura t a partir de la distancia i de la celda de carga y la temperatura promedio de las capas asfálticas a una profundidad de 40 mm.

Kim et al. (1995) también desarrolla una fórmula que contempla factores de corrección tanto para las deflexiones como para el módulo retrocalculado. Estos autores comenzaron haciendo un análisis comparativo de la Guía de Diseño AASHTO 1993 para ver la influencia de usar como temperatura efectiva la de la superficie contra usar la temperatura media de la carpeta asfáltica de acuerdo a su espesor. Con una relación no lineal de las deflexiones recolectadas de 4 secciones de pavimento en North Carolina y la temperatura media obtenida de los termopares instalados en intervalos de 25 a 50 mm dependiendo de la profundidad de las secciones, se determinó la expresión a una temperatura de referencia. Las variables principales contempladas en esta investigación fueron la estación del año, la deflexión medida en el centro del carril y en la calzada, la hora del día, el espesor de las capas y la temperatura a profundidad media.

3.3 Análisis con modelo de predicción del perfil de temperatura

Un paso importante para determinar el coeficiente de corrección a la temperatura de referencia, es la determinación de una temperatura efectiva de la carpeta asfáltica. Esta temperatura se podrá determinar por medio de la predicción del perfil de temperatura.

Los modelos estadísticos son los que mejor predicen las temperaturas extremas (máximas y mínimas diarias) del pavimento a cierta profundidad. Shao et al. (1997) forman un modelo de predicción basado en la teoría de conducción de calor en donde la condición límite es la obtención de un historial de la temperatura de la superficie y las temperaturas máximas y

mínimas presentadas en ella, tomando como referencia principal la difusión térmica, las profundidades y el tiempo. Los datos de entrada para este modelo son sencillos de recabar y se describen a continuación:

Datos de temperatura y clima: Valor máximo y mínimo de la temperatura de un día antes a la prueba, clima del día anterior, temperatura de la superficie medida al momento de la prueba.

Ubicación: Latitud, espesor de la carpeta asfáltica.

Propiedades del material: Difusión térmica, absorción solar, emisividad, conducción térmica, coeficiente de transmisión, coeficiente de la radiación atmosférica, coeficiente de transferencia de calor superficial.

Finalmente, otro modelo que permite la predicción del perfil de temperatura es presentado por Alavi et al. (2014) quienes describen en su trabajo los fundamentos y bases de un modelo propuesto utilizando el método de Finite Control Volume Method, por sus siglas en inglés FCVM, para resolver ecuaciones de difusión. El modelo propuesto a través de la explicación de mecanismos de transferencia de calor de la superficie del pavimento crea un software compatible con Windows llamado Pavement Temperature Profile (TEMPS) para perfilar la temperatura del pavimento a diferentes tiempos y profundidades variables y obtener un historial de temperatura del pavimento.

El software desarrollado en la Universidad de Nevada, Reno por el departamento de ingeniería civil y ambiental, incluye cuatro secciones principales. La primera consiste en introducir la información del proyecto, posteriormente se insertan las propiedades de los materiales y la información climática de la zona, se crean las características de la superficie y finalmente se inserta la estructura del pavimento con sus respectivos tipos de material y espesores de capa.

A continuación, se describen los datos de entrada para este modelo, son algunos parecidos a los del modelo anterior e igualmente, de obtención posible. Estos son:

Datos climáticos: Temperatura del aire y velocidad del viento

Datos meteorológicos: Radiación solar

Propiedades de radiación de la superficie del pavimento: Albedo, emisividad y coeficientes de absorción.

En la tabla 2 se presenta una comparación de los principales trabajos que han propuesto un factor de ajuste y la propuesta presentada en este trabajo de investigación. En la tabla 1 se presentan primero aquellos trabajos que proponen un factor de ajuste y además lo incorporan en una nueva ecuación de ajuste para la corrección de las deflexiones por el factor de temperatura. Se incluye el tipo de enfoque utilizado para encontrar el factor de ajuste propuesto, ya que algunos llevan a cabo una comparación de fórmulas y otros autores encuentran el factor por el método de regresión lineal. Finalmente, en la última columna se presenta el método de validación empleado, puesto que algunos autores utilizan un método experimental enfocado a realizar pruebas de deflexiones en campo y otros emplean modelos para la predicción de temperatura con el fin de determinar el campo de temperatura a profundidades variables del pavimento.

Tabla 2. Trabajos estado del arte (Elaboración propia, 2023)

Cita	Factor de ajuste		Tipo de enfoque		Método de validación	
	FC: Factor corrección	EC: Ecuación de ajuste	Comparativo	Análisis de regresión	Termopares	Predicción de temperatura
Pérez, A., Garnica, P., García, R., & Cruz, S., 2015	✓	✗	✓	✗	✗	✗
Březina, I., Machel, O., & Závřel, T., 2022	✓	✓	✗	✓	✗	✗
Pais, J., Santos, C., Pereira, P., & Kaloush, K., 2020	✓	✓	✓	✗	✗	✗
Zheng, Y., Zhang, P., & Liu, H., 2019	✗	✓ temp prom	✗	✓	✓	✗
Ramos García, J. Antonio ; Castro, María, 2011	✓	✗	✓ Prueba significancia	✗	✗	✗
Straube, E., & Jansen, D., 2009	✗	✓ Geófonos i	✗	✓	✓	✗
Chen, D. H., Bilyeu, J., Lin, H. H., & Murphy, M., 2000	✗	✓ W1 y W2 temp prom	✗	✓	✓	✗
Park, D. Y., Buch, N., & Chatti, K., 2001	✓	✓	✗	✓	✓	✓
Kim, Y. R., Hibbs, B. O., & Lee, Y. C., 1995	✗	✓	✓	✓	✓	✗
Propuesta 2021-2023	✓	✓	✓	✓	✗	✓

La tabla 3 muestra los dos modelos de predicción identificados en la revisión basados en enfoques de diferentes y con sus respectivos datos de entrada para el modelo ejecutado.

Tabla 3. Tabla de modelos de predicción de temperatura (Fuente: Elaboración propia, 2023)

Modelos de predicción de temperatura		
Cita	Tipo de enfoque	Datos de entrada
Shao, L., Park, S., & Kim, Y. (1997).	Teoría de conducción de calor	Datos de temperatura y clima: Valor máximo y mínimo de la temperatura de un día antes a la prueba, clima del día anterior, temperatura de la superficie medida al momento de la prueba. Ubicación: Latitud, espesor de la carpeta asfáltica. Propiedades del material: Difusión térmica, absorción solar, emisividad, conducción térmica, coeficiente de transmisión, coeficiente de la radiación atmosférica, coeficiente de transferencia de calor superficial.
Alavi, M. Z., Pouranian, M. R., & Hajj, E. Y. (2014)	Método de FCVM ecuaciones de difusión: Mecanismos de transferencia de calor de la superficie del pavimento	Datos climatológicos: Temperatura del aire y velocidad del viento. Datos meteorológicos: Radiación solar Propiedades de radiación de la superficie del pavimento: albedo, emisividad y coeficientes de absorción.

3.4 Trabajos relacionados al estudio de la prueba de deflexión

3.4.1 Modelo de corrección para la medición continua de la deflexión

Como se ha hablado anteriormente, la temperatura es el principal factor de influencia en la capacidad de soporte del pavimento. Liao et al. (2019) aseguran que la temperatura de la superficie además de que varía a lo largo del día, puede llegar a los 70° C durante días de verano. La corrección de la temperatura del pavimento es ampliamente reconocida como un problema difícil y continúa el debate sobre la mejor estrategia para los modelos de normalización de la temperatura.

Normalmente, la influencia de la temperatura del pavimento en el valor de deflexión medido se corrige mediante un coeficiente de corrección de temperatura, como el siguiente mostrado en la ecuación 5:

$$D_{T_{ref}} = D_T K_T \quad (5)$$

Donde $D_{T_{ref}}$ es la deflexión a una temperatura de referencia, D_T es la deflexión medida y K_T es el coeficiente de corrección de temperatura. Los coeficientes de temperatura dependen de factores como la temperatura actual (T), el espesor de la carpeta asfáltica (H), el módulo de resiliencia (E_0), si es fisurado C , la ubicación de la medición en el segmento (L) y finalmente, tipo y material de la subrasante (S y M respectivamente). En la siguiente tabla se muestran algunos métodos de corrección, factores de los que dependen, temperatura de referencia y si es presentado mediante gráfico o ecuación:

Tabla 4. Autores y variables que proponen en las fórmulas planteadas (Fuente: Liao et.al., 2019)

TABLE 1: Correction of the temperature effect on a continuous dynamic deflectometer.

Author	Depends on factors	T_{ref}	Relationship
AASHTO [19]	T, H, M	21.1°C	Graph/nomograph
MOT [26]	T, H, E_0	20.0°C	Equation
SHRP [27]	T, H, S	21.1°C	Graph/nomograph
Zheng et al. [28]	T, H	20.0°C	Equation
Chen et al. [29]	T, H, C, T_{ref}	-	Equation
Kim et al. [30]	T, H, L	20.0°C	Equation

3.4.2 Efecto de corte del sensor 2

En algunas ocasiones se han registrado resultados inconsistentes pertenecientes al sensor de medición número 2 ubicado a 300 mm del medio de la celda de carga. Este sensor como tiene su posicionamiento cerca al borde de la placa de carga en pavimentos altamente flexibles produce un fenómeno de corte o cizalla pues es el resultado de una onda de tensión inducida por la carga de impacto y una distribución de tensión no uniforme debajo de la placa de carga relativamente rígida, con mayor intensidad de tensión hacia el borde de la placa. Por ello el sensor registra una desviación de la deflexión medida en el desplazamiento de 300 mm o cuando se posiciona a 200 mm es más crítico puesto que el borde de la placa se encuentra a

150 mm de su punto central y entre menor sea el espaciamiento entre el borde y el posicionamiento del sensor más crítico el resultado. A continuación, se muestra la imagen 13 que representa este comportamiento y señala la desviación de deflexiones con respecto al cuenco de deflexiones (línea verde).

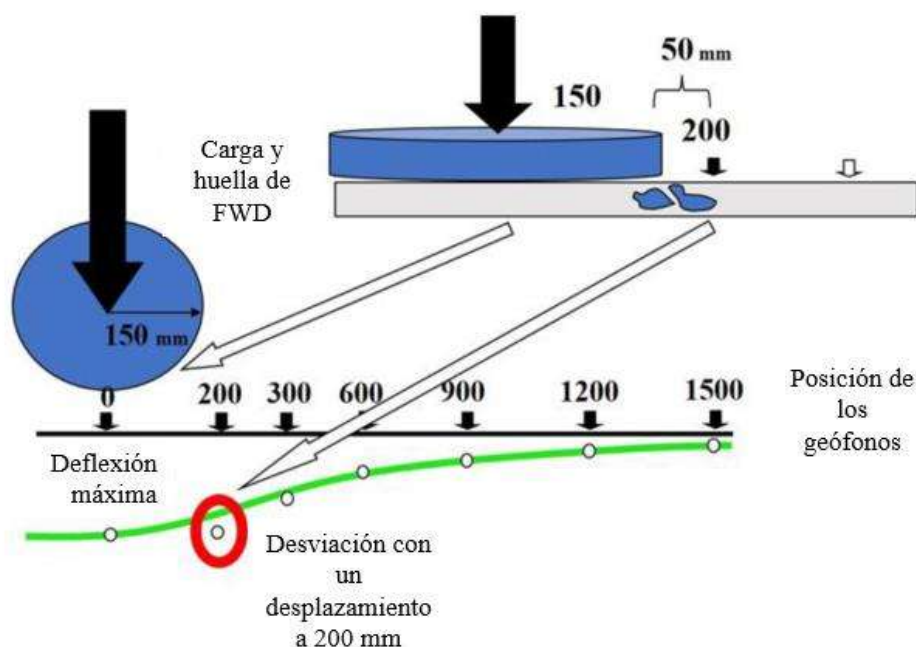


Imagen 13. Efecto corte del sensor 2 (Fuente: Rubicon Solutions, 2023)

Para realizar un mejor análisis de deflexión en el sensor 2 o en casos donde está presente la desviación de la deflexión en el desplazamiento de 300 mm. Se recomienda interpretarse y usarse con precaución los resultados de deflexión arrojados en este sensor o en dado caso ignorar la deflexión registrada en el sensor 2. Además de ello tener un buen control de su posicionamiento y evitar la cercanía con el borde de la placa (Rubicon solutions, 2023).

3.5 Zonas geoeconómicas

Con el fin de definir la priorización de ingresos para conservación, modernización y construcción de carreteras la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) estima los costos de las carreteras de acuerdo a su clasificación ya sean carreteras de altas especificaciones, carreteras tipo A, B C, etc. Las carreteras se encargan de proporcionar acceso y comunicación para distribuir productos o servicios, por ellos las ciudades, zonas industriales y puertos marítimos necesita estar comunicados con una buena infraestructura

vial. Los 15 corredores carreteros son corredores con conexión portuaria y por ende son las redes carreteras nacionales que mayor atención se les presta.

Se calcularon 12 factores referenciados a la zona centro en la que se incluye la Ciudad de México y su área metropolitana, que identifican la diferencia del costo que presentará la carretera proyectada y sus estructuras en determinada zona con respecto a la zona centro (SICT, 2021).

En la tabla 5 se presentan los factores y porcentajes de diferencia correspondiente a la tabla 4 del documento (SICT, 2021) factores intergeoeconómicos para costos de construcción.

Tabla 5. Factores y porcentajes de diferencia en relación al centro (Fuente SICT, 2021)

FACTORES Y PORCENTAJES DE DIFERENCIA EN RELACIÓN AL CENTRO				
LITERAL	NOMBRE	CIUDAD	FACTOR	%
A	FRONTERA NOROSTE	Tijuana	1.0556	5.56
B	FRONTERA NORESTE	Matamoros	1.0234	2.34
C	PENÍNSULA NORTE	La Paz	1.0569	5.69
D	PACÍFICO NORTE	Culiacán	1.0094	0.94
E	PACÍFICO CENTRO	Guadalajara	0.9898	-1.02
F	PACÍFICO SUR	Acapulco	1.0308	3.08
G	PACÍFICO SURESTE	Oaxaca	1.0075	0.75
H	GOLFO	Veracruz	1.0108	1.08
I	GOLFO SURESTE	Cancún	1.1163	11.63
K	CENTRO NORTE	Monterrey	0.9935	-0.65
K	BAJÍO	León	0.9932	-0.68
L	CENTRO	México	1.0000	0

Posteriormente, se muestra el mapa de México con las distribuciones por zonificación geoeconómica. Ver imagen 14.



Imagen 14. Zonas geoeconómicas para costos de construcción (Fuente SICT, 2021)

3.6 Perfil Topográfico-Deflectométrico de los pavimentos

El perfil topográfico representa el relieve del terreno, es decir su altitud con respecto al cadenamiento. Este se usa mucho en el diseño de carreteras pues las velocidades que adquieren los vehículos dependen de esta condición. En pendientes descendentes los vehículos alcanzan velocidades de desplazamiento altas, en pendientes ascendentes los vehículos tienen velocidades menores. Sin embargo, plantearlo como parte de un factor de influencia en el desempeño del pavimento resulta muy interesante pues justo cuando las velocidades de desplazamiento son menores los vehículos concentran más sus cargas en el pavimento.

En la evaluación estructural, si se sobrepone el relieve del terreno con el análisis clásico de deflexiones medidas y cadenamiento resulta un gráfico de tres ejes donde se puede estudiar el comportamiento viscoelástico de las capas asfálticas. Tomando en cuenta que la deflexión máxima está relacionada totalmente con los materiales asfálticos de un pavimento flexible.

En los gráficos de la imagen 15 y 16 que se muestran a continuación se puede apreciar lo siguiente:

Se tiene un perfil topográfico (línea azul) a lo largo de una distancia definida (cadenamiento). La posición del vehículo representa la dirección hacia donde se desplaza. En este caso va en sentido de cadenamiento descendente. En la segunda imagen si vemos el perfil topográfico, ese vehículo y todos los otros vehículos pesados van en pendiente ascendente. Dada su carga y peso, se desplazan a una velocidad o frecuencia muy baja la cual genera deflexiones altas en los pavimentos debido a que deterioran mucho al pavimento al estar más tiempo concentrada la carga. Los círculos de color rojo indican altas deflexiones y se presentan justamente donde se tiene la mayor pendiente ascendente. El comportamiento de las deflexiones sigue un poco el perfil topográfico. Es decir, en la primera imagen (ver imagen 15) donde hay una pendiente descendente las deflexiones no registran picos y tiene un comportamiento más homogéneo, en la segunda imagen (ver imagen 16) en la pendiente ascendente, se registran picos justo en la zona de pendiente pronunciada. (Elaboración propia, 2023)

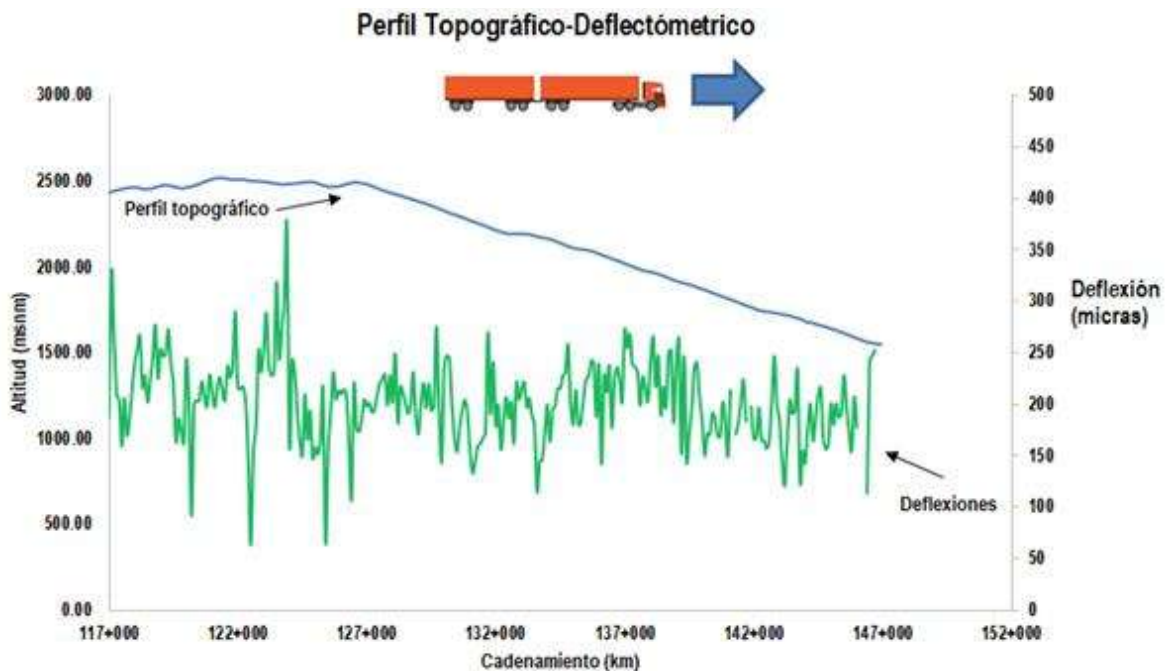


Imagen 15. Gráfico perfil topográfico- deflectométrico (Fuente: Elaboración propia, 2023)

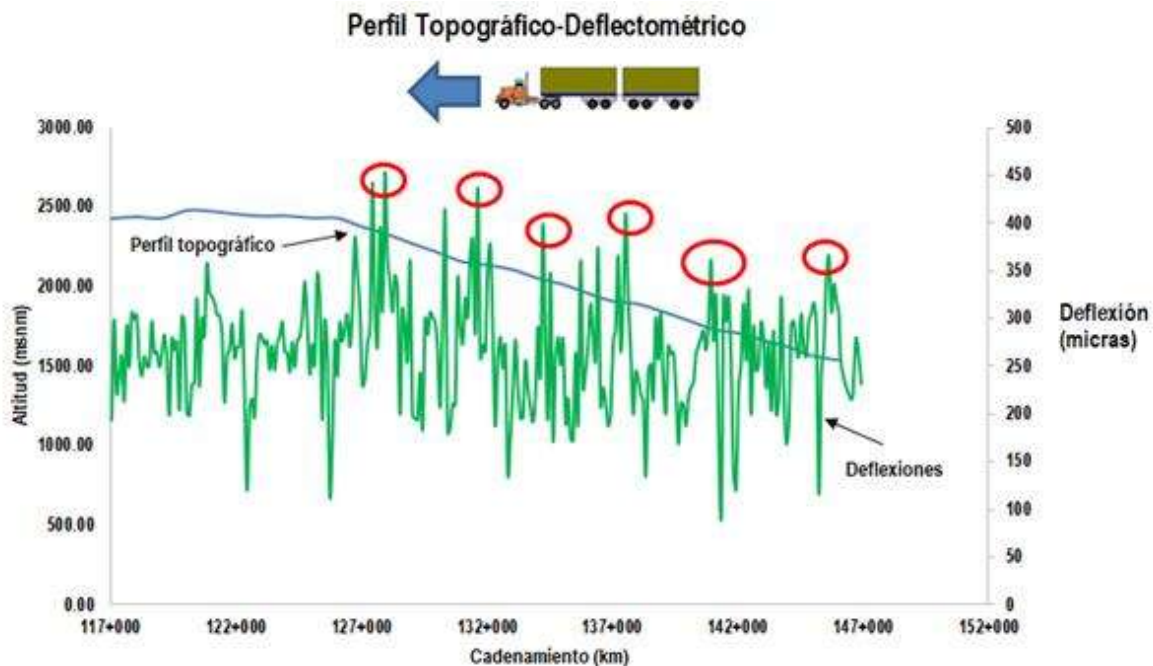


Imagen 16. Gráfico perfil topográfico- deflectométrico (Fuente: Elaboración propia, 2023)

3.7 Procedimiento de medición de temperatura en la carpeta asfáltica

Medir la temperatura interna de la carpeta asfáltica resulta de gran importancia al momento de comprobar los resultados de temperatura a z profundidad de los modelos de predicción de temperatura puesto que con referencias de campo se tiene más noción de acuerdo al espesor total de la carpeta y de las capas posteriores. Así mismo, considera las variaciones de radiación solar y otras variables que afecten la temperatura como espesores totales del pavimento.

La medición se ejecuta en el acotamiento de la carretera, se comienza realizando un pequeño orificio con un taladro y se introduce un termómetro que sea capaz de registrar temperaturas altas y bajas con buena precisión, este en prácticas usuales se refiere a un termómetro digital. Al orificio se le coloca una pequeña cantidad de líquido de transferencia de calor (aceite mineral, aceite para vehículos, glicol, etc.) esto con el fin de estabilizar la temperatura del pavimento. Se coloca el termómetro digital hasta la profundidad que se requiera conocer la temperatura. Finalmente se sugiere tapar el orificio realizado para evitar futuros daños (Lukanen et al., 2005).

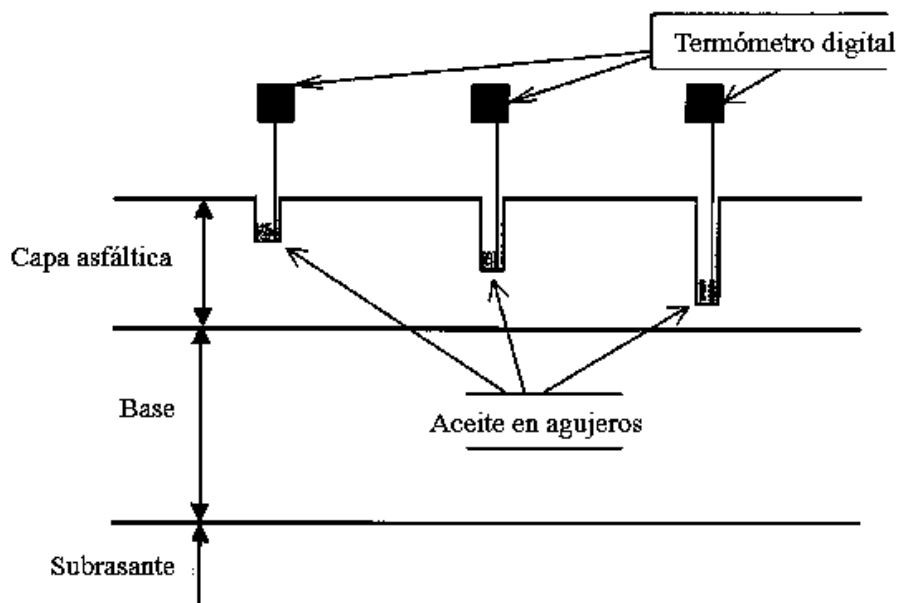


Imagen 17. Medición de temperatura en sección. Fuente: (Park, Buch, & Chatti, 2001)

3.8 Delimitación de tramos homogéneos utilizados en pavimentos

En actividades de rehabilitación y conservación de pavimentos flexibles se deben de identificar tramos o segmentos del corredor carretero donde se llevarán a cabo las actividades a realizar. Usualmente se deben de evaluar los segmentos de manera individual para poder definir las acciones de conservación y rehabilitación más convenientes de acuerdo a la problemática existente pero cuando se tienen varios segmentos depende del criterio del ingeniero la evaluación de los tramos homogéneos obtenidos y determinar si dos o más tramos se pueden combinar o aplicar las mismas acciones por fines económicos y de rendimiento en su construcción.

Un tramo homogéneo es un segmento de carretera que tiene características semejantes en cuanto a tipo de pavimento, deterioros, deflexiones, topografía, tránsito, etc. (Coria Gutiérrez, 2019). Como se muestra en la imagen 18 el mismo corredor carretero tiene variaciones de su composición estructural debido a rehabilitaciones que se hayan realizado anteriormente, diseños específicos desde la construcción de cada segmento, cargas concentradas por puntos y demás variaciones que se pueden presentar.

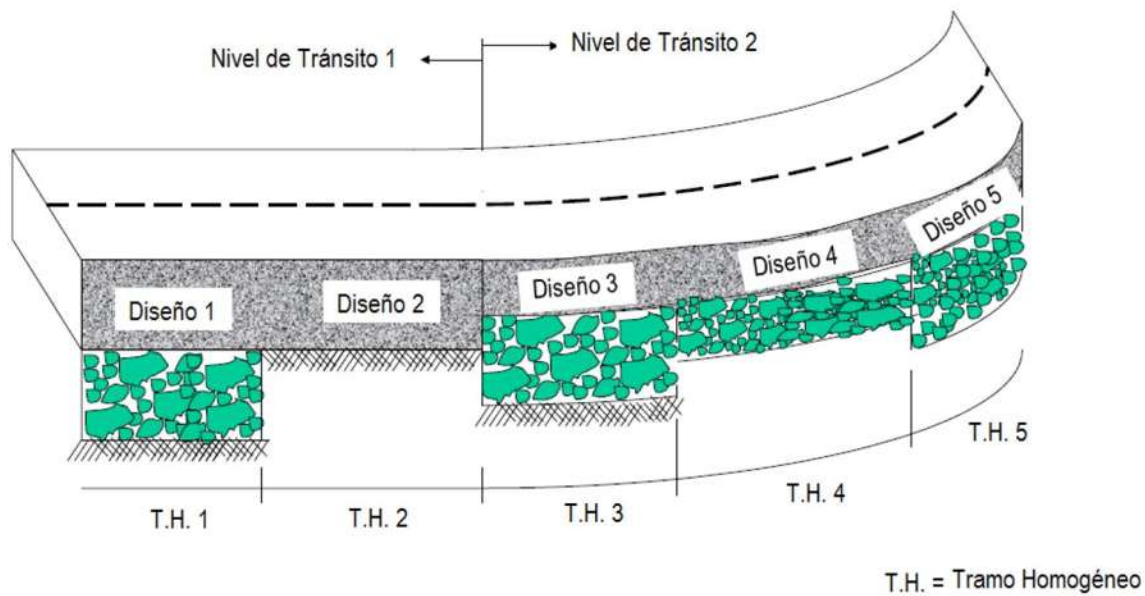


Imagen 18. Delimitación de tramos homogéneos. Fuente: FHWA (2002)

Existen dos métodos para la delimitación de tramos homogéneos: el método de Sobreposición de factores y el método de la respuesta medida en el pavimento o método de diferencias acumuladas. El método de sobreposición de factores consiste en sobreponer valores de: Tipo de pavimento, historial de actividades realizadas, sección del pavimento, tipo de subrasante y tránsito. Sin embargo, actualmente, la metodología más empleada es el método de diferencias acumuladas. El método de las diferencias acumuladas es un método estadístico utilizado por la AASHTO 1993 conforme al apéndice J de la Guía de Diseño Estructural de Pavimentos para establecer Secciones Homogéneas de acuerdo a mediciones de respuesta, la más utilizada es la deflexión máxima, sin embargo, pueden ser la serviciabilidad, la fricción, el tránsito, el IRI, entre otros (López Niño, 2017).

Por medio de estas respuestas y el cadenamiento del tramo se obtienen las áreas acumulativas totales. Cada diferencia de condiciones en la medición representa un tramo, puesto que cada límite coincide con el lugar de cambio de pendiente, así como se muestra en la imagen 19 que en cada cambio de positiva a negativa o viceversa se registra un nuevo tramo homogéneo.

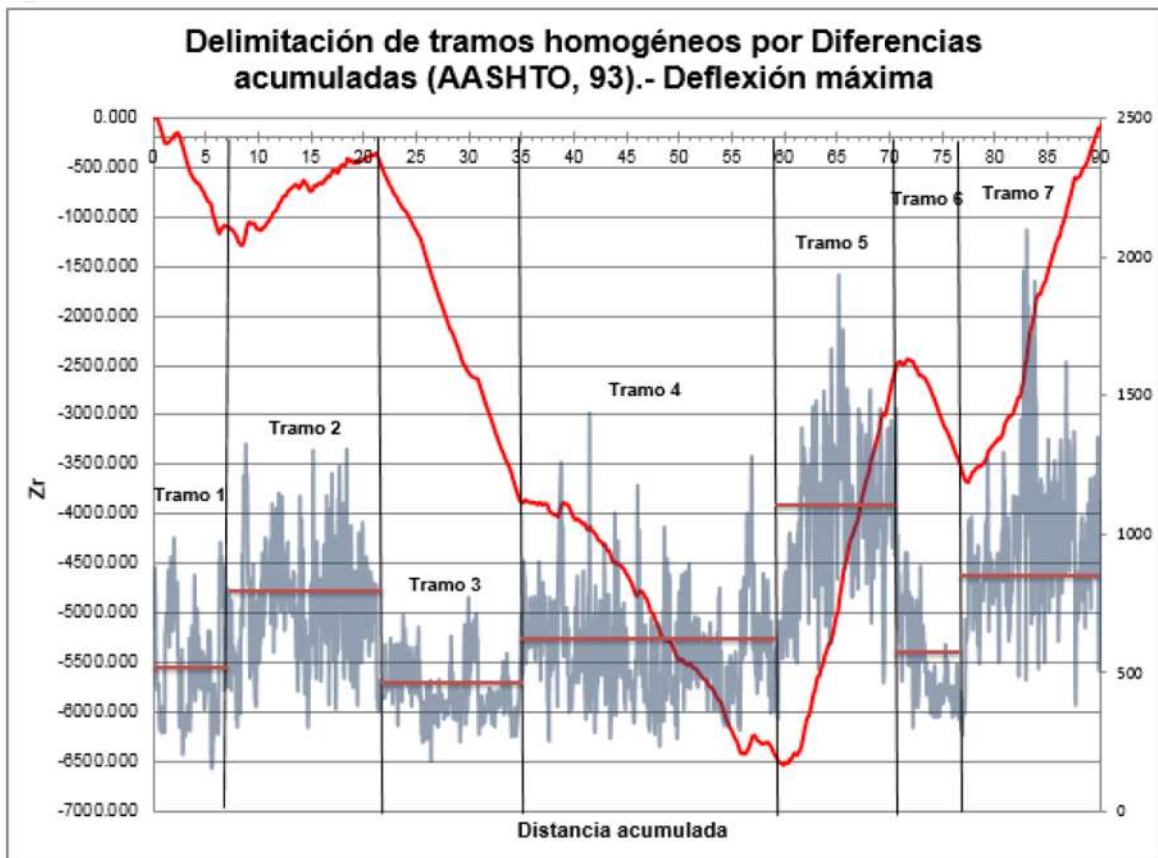


Imagen 19. Delimitación de tramos homogéneos por diferencias acumuladas Fuente: AASHTO, 93

En muchas ocasiones no es conveniente tener longitudes de tramos pequeñas debido a que como se mencionó anteriormente por fines constructivos y económicos se busca establecer longitudes mínimas en la delimitación de los tramos del orden de 5 kilómetros de longitud como mínimo (DGST, 2015). Si la delimitación de tramos homogéneos no se hace correctamente, pueden tenerse ineficiencias en la evaluación del pavimento y puede dar como resultado estrategias de rehabilitación o conservación de pavimentos sobre o sobredimensionadas lo que trae como resultado deterioros prematuros o altos costos en la construcción.

3.9 Retrocálculo de módulos de capa de pavimento y relación de Poisson mediante minería de datos

El método del uso con el FWD es un método no destructivo debido a que durante las pruebas no realizan ninguna intervención al pavimento ni a ningún elemento. A partir de estos datos de campo se pueden obtener las propiedades de los materiales in situ mediante el retrocálculo.

Estas propiedades del pavimento flexible incluyen los parámetros de módulo elástico, relación de Poisson, y espesores de capas. Por ello, es importante realizar varias pruebas de deflexión en diferentes lugares a lo largo de la sección de la carretera con el fin de obtener módulos confiables (Rakesh et al., 2006). Este es el riesgo de estimar las características de las capas con tan solo el perfil de deflexiones.

El retrocálculo es una evaluación de las cuencas de deflexión de la superficie del pavimento generadas por varios dispositivos de deflexión del pavimento. El proceso de retrocálculo consta que las propiedades de capa asumidas en el modelo calculado se ajusten hasta que produzcan una deflexión superficial que se asemeje mucho a la medida en campo. Por ello, los resultados dependen del criterio de quien está realizando el retrocálculo si se considera oportuno seguir con el procedimiento iterativo de ajustar los módulos de las capas del pavimento hasta obtener quizá un mayor acercamiento entre las cuencas de deflexión experimentales y las cuencas de deflexión teóricas, con cierta tolerancia de desfase.

El proceso de retrocálculo es una operación inversa de saber las características del pavimento y estimas las deflexiones debido a la carga. Sin embargo, algunas veces no se obtienes dichas características debido a que carecen de precisión a pesar de la existencia de muchos programas de retrocálculo que emplean diferentes procedimientos y algoritmos. Mediante este proceso se pueden predecir las propiedades mecánicas del pavimento de manera realista en campo inmediatamente de que se prueba (Hassan et al., 2003).

El estudio de Saltan et al. (2011) se centra en el uso de herramientas de retrocálculo de pavimento basadas en minería de datos (DM) para determinar los módulos elásticos in situ y la relación de Poisson del pavimento asfáltico a partir de deflexiones. Producto de esta investigación, sería la primera vez que se lleva a cabo un retrocálculo del módulo elástico de la capa de pavimento y la relación de Poisson con minería de datos lo cual lo hace bastante interesante.

El método de minería de datos es usado ampliamente como una herramienta computacional que integra estadística, proceso de señales, etc. ayudando a la extracción de información que posteriormente se pueda predecir de grandes bases de datos. Esta herramienta ayuda a resolver grandes cuestionamientos que requieren de mucho tiempo para resolverse mediante métodos basados en principios teóricos. El procedimiento general de la minería de datos es:

Primero la comprensión empresarial, comprensión de datos, preparación de datos, modelado por 7 métodos distintos (regresión lineal, red neuronal de retropropagación, KStar, regresión de ritmo, optimización mínima secuencial, M5P, M5Reglas), evaluación y finalmente el desarrollo. En la estimación del módulo elástico y la relación de Poisson, el método de minería de datos (DM) no se ha utilizado antes como una herramienta de retrocálculo. Al observar los resultados del estudio, el método Kstar es el que mayor podría adaptarse a usarse como herramienta de retrocálculo porque brinda buenos resultados dando un error cuadrático de 0.99 con respecto a otros métodos DM.

3.10 Caracterización de las influencias estacionales en pavimentos asfálticos con el uso del deflectómetro de impacto

La investigación realizada por el autor Van Gurp (1995) tiene como objetivo cuantificar las variaciones de temperatura en la rigidez de la capa del pavimento asfáltico para poder determinar finalmente donde deben estar posicionados los transductores de deflexión para asegurar la mayor sensibilidad de las deflexiones a los cambios de rigidez de dicha capa.

Asegura que la rigidez de la capa asfáltica es afectada por la combinación de la duración de la carga y la temperatura en la prueba. Entre mayor tiempo de carga y mayor temperatura, menor rigidez de la capa asfáltica. Por esta razón, los valores de deflexión cerca a la celda de carga y los valores de retrocálculo siempre se normalizan a una temperatura de referencia. Esta temperatura de referencia puede establecerse en un valor elegido arbitrariamente o puede basarse en las temperaturas medias anuales ponderadas del aire y el pavimento.

Efectuaron unas pruebas de campo considerando lo siguiente: Primero que se establecieran 9 ubicaciones de prueba, cerca de la ciudad de Delft limitado a un radio aproximado de 100 km, que fuera un lugar donde se pudieran obtener análisis futuros sobre los datos de espesores de capa, propiedades del material, datos de tráfico, etc. Que la intensidad de tráfico fuera baja para disminuir la influencia del tráfico y finalmente, que se abarcaran diferentes tipos de subsuelos en los nueve sitios de prueba.

La temperatura ambiente y del pavimento son registrados al inicio y final de la prueba, así como la hora para estimar la temperatura del asfalto en cada golpe. Con este análisis el autor realiza una suposición de: si la temperatura del asfalto es de 12°C y 15°C y se dan entre las 9

am y las 10:30. Eso significa que tiene una tasa de incremento de temperatura de $1/30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ en este intervalo de tiempo. Así que a las 9:36 am se estima $12 + 36/30=13.2^{\circ}\text{C}$.

Por lo anterior, en el estado del arte podemos observar la necesidad de investigar sobre el tema de la influencia de la temperatura en las deflexiones del pavimento, debido a que otros autores han analizado este tema de acuerdo con calibraciones en pavimentos en zonas muy específicas y pueden no ser una referencia para la relación entre el comportamiento de las deflexiones puesto a las diferentes zonas climáticas encontradas en México. Sin embargo, es importante integrar los conceptos antes mencionados para evaluar de manera correcta la información que se utilizará en la investigación. Así mismo, es de gran ayuda conocer las distintas metodologías de ajuste por los distintos autores y sus resultados obtenidos.

Capítulo 4. Metodología

Se propone una metodología para desarrollar el análisis del comportamiento de las deflexiones en función de la temperatura superficial por medio de la representación del gradiente térmico generado en las capas estructurales del pavimento y la incorporación de los factores que pueden ser integrados en la influencia de la temperatura en las deflexiones. Se resalta la importancia de estudiar los efectos de la temperatura ya que influyen en las capas que conforman la estructura del pavimento y afectan la respuesta estructural de las mismas. Por lo que se requiere mejorar la precisión en los valores obtenidos de deflexión, lo que repercutirá en los diseños de rehabilitación del pavimento.

La metodología se compone principalmente por cuatro fases importantes. Ver imagen 20.

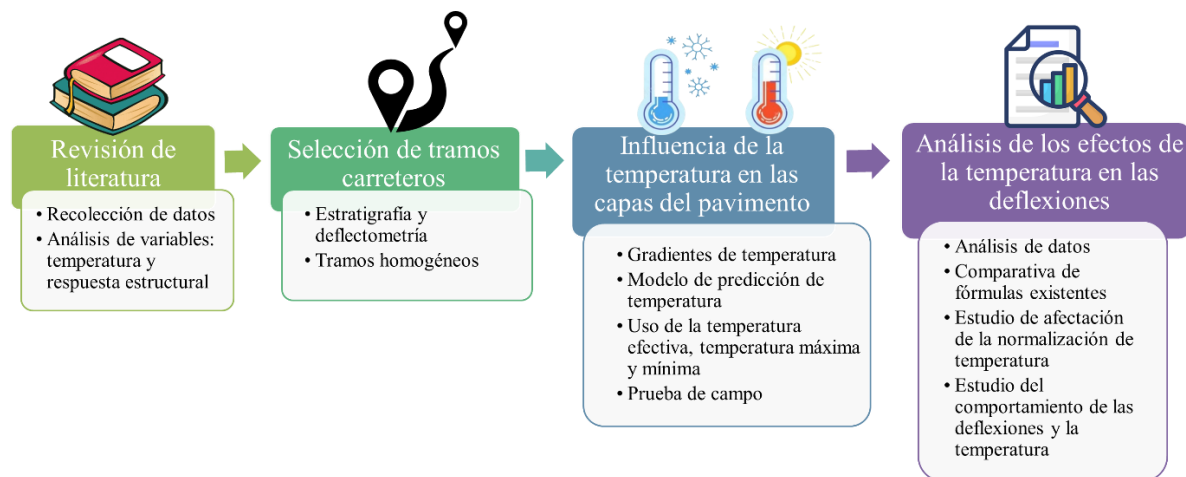


Imagen 20. Propuesta metodológica para el análisis de los efectos de la temperatura en las deflexiones de los pavimentos flexibles. Fuente: Elaboración propia, 2023

La primera fase consiste en una revisión de literatura, donde se recaban datos sobre las variables que influyen dentro de la respuesta estructural del pavimento ante una carga impuesta y la recolección de aquellos datos que deberán considerarse para estudiar el campo de temperatura dentro del pavimento.

La segunda fase de igual forma, comienza con una recolección de datos recabados de algunos tramos de la red carretera nacional. Este proceso de análisis de la información de campo es quizá, de los más importantes dentro del desarrollo del proyecto ya que es donde se comenzará a crear las bases de datos. Estos datos deberán contener la deflectometría y la estratigrafía de tramos nacionales, cuyas características climáticas sean notables y con

condiciones de temperatura diferentes entre los tramos; así como mediciones realizadas a diferentes días del año, para poder abarcar la mayor cantidad de temperaturas significativas en el estudio.

Para el estudio fue proporcionada la información de deflectométrica de varios segmentos de la red carretera federal del año 2020 conteniendo información de las autopistas, corredores carreteros, red básica libre y red secundaria. A grandes rasgos contiene la estratigrafía con la que se podrán conocer los espesores de las capas y las características que conforman el pavimento. Esta se realiza mediante sondeos efectuados en cadenamientos del tramo. Por otra parte, la deflectometría la cual proporciona información como: los desplazamientos verticales (deflexiones), los datos generales tomados y almacenados en la computadora del equipo de medición FWD (temperatura de prueba del aire y de la superficie, latitud, longitud y elevación), las deflexiones normalizadas por esfuerzo (700 kPa), el perfil de deflexiones por cada sensor, el estadístico del resultado de deflexiones, el comportamiento estructural, la deflexión máxima y el área normalizada de la cuenca de deflexiones.

De la información, se elegirían tramos representativos de los 15 corredores carreteros de la red nacional carretera. Se debe elegir 1 tramo de cada corredor carretero para realizar el análisis correspondiente de esta investigación. Sin embargo, la selección de este tramo se debe de hacer de acuerdo a condiciones críticas como el tránsito circulando (TDPA) por este tramo y otras condiciones desfavorables como temperatura, topografía, entre otras. Además de que los tramos seleccionados tengan conexión de rutas de transporte importantes.

Así mismo, se hace una selección de segmentos de tramos de acuerdo a el criterio de tramos homogéneos. Puesto que los tramos que fueron proporcionado tienen longitudes variables y se busca estandarizar a una longitud aproximada con el fin de estudiar la información de manera homogénea. Parte de la zonificación de estos segmentos viales es de acuerdo al argumento de que los tramos seleccionados estén situados en distintas zonas climáticas para poder abarcar la mayor cantidad de climas presentados en la República nacional.

La tercera fase consiste en el estudio de la temperatura en las capas del pavimento mediante el análisis de los gradientes de temperatura, lo cual se refiere a la temperatura a lo largo de la profundidad de la estructura y la transferencia de calor que sufren las capas de acuerdo al espesor de cada una. Como herramienta de análisis se usará un modelo de predicción con el

fin de encontrar una temperatura más cercana a la real del pavimento, la cual es la temperatura efectiva y evidenciar los gradientes de temperatura mencionados anteriormente. A través del perfilamiento de la temperatura se determina el comportamiento futuro que tendrá el balance de energía térmica de las capas del pavimento, tomando en cuenta las energías térmicas entrantes y salientes, además del calor disipado a través de las capas subyacentes a la superficial. Para ello, se empleará el software propuesto por Alavi et al. (2014) que es capaz de predecir el perfil y el historial de la temperatura del pavimento con la ayuda de un modelo de estimación de temperatura para estructuras de pavimento denominado Pavement Temperature Profiler (llamado por sus siglas en inglés, TEMPS) con el método de volumen de control finito.

Por otra parte, con el uso de un historial de datos climáticos de México se deben analizar las temperaturas máximas, mínimas y la temperatura media presentada en los estados del país para poder tener una noción de cuál es la temperatura predominante nacional y posterior a ello, obtener una temperatura de referencia cercana a las condiciones climáticas del país.

Un método de validación importante es unas pruebas de campo realizadas con el deflectómetro de impacto en algún tramo de la república en la cual se tenga un ambiente controlado y detalle de toda información que pueda ser relevante en el estudio. Con estas pruebas se podrán trabajar valores de temperatura y deflexiones conocidas.

La cuarta fase consiste en el análisis de los efectos de la temperatura en las deflexiones comenzando con el análisis de datos recopilados y el estudio de las afectaciones en la normalización de las deflexiones por temperatura. Para este proceso de ajuste, autores han planteado distintas fórmulas de ajuste mediante diferentes metodologías. Por ello se recaban estas fórmulas planteadas por los autores seleccionados, donde se hará una comparativa de las fórmulas de la bibliografía con un mismo dato de deflexiones de campo.

Para un mejor entendimiento y mayor análisis observacional, se realizarán gráficas comparativas que ayuden a observar las variaciones que producen los coeficientes de cada fórmula de ajuste por temperatura y se hará un estudio de las afectaciones que tiene la corrección de la temperatura en la respuesta estructural del pavimento.

Finalmente, como última etapa de la investigación se realiza un tratado de datos necesario que permita estudiar el comportamiento de las deflexiones y la temperatura con el uso de los distintos tramos seleccionados.

Capítulo 5. Resultados

5.1 Base de datos de la Dirección General de Servicios Técnicos

La Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT), a través de la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) continuamente realiza la medición de distintos parámetros de la Red Carretera Federal. Esto lo hace a partir del Programa Nacional de Auscultación de Carreteras Federales con el fin de conocer y evaluar las condiciones superficiales, estructurales y de seguridad vial de las carreteras libres y de cuota del país (SICT, 2022) Derivado de este programa se recopilan datos de indicadores de desempeño y estructurales tales como: Profundidad de rodera (PR), Macrotextura (MAC), Índice de regularidad internacional (IRI), Coeficiente de fricción (CF), Deterioros (DET) y Deflexiones del pavimento (DEF).

Esta evaluación se realiza mediante el uso de equipos de alto rendimiento y la aplicación de parámetros de medición de calidad aceptados internacionalmente y especificados en cada una de las normas de conservación de carreteras en el apartado de evaluación de pavimentos dada por la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes N·CSV·CAR·1·03·010/17 (SICT). Las mediciones son realizadas cada año consecutivo en el caso de todos aquellos parámetros que no pertenezcan a la evaluación estructural, puesto que las deflexiones son realizadas cada dos años.

La Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) realiza estas pruebas debido a que son la entidad responsable de establecer los procedimientos y evaluar las redes viales federales para conocer su estado físico, de confort y condiciones de seguridad de tal manera saber que ofrece la infraestructura carretera a los usuarios que la operan.

Conociendo las condiciones físicas de los pavimentos desde el punto de vista funcional, estructural y de seguridad vial mediante estos datos de auscultación ayuda a diseñar programas para la mejoría de estas condiciones del sistema vial del país. Permite la planeación de programas de mantenimiento y conservación de carreteras realizadas por las empresas responsables de las carreteras a su cargo, para que con ello puedan brindar un mejor servicio.

Para el estudio se solicitó esta información, pero solo la correspondiente al análisis estructural, es decir, las deflexiones. Esto con el fin de obtener una amplia base de datos y tener bastante información que se pudiera usar en la investigación. Finalmente, la Dirección General de Servicios Técnicos nos proporcionó un archivo que contiene la información más reciente de deflectometría y estratigrafía de los corredores carreteros, esta información corresponde al Programa Nacional de Auscultación del año 2020. Los resultados entregados son una base de datos geo-referenciada, en los cuales se procesa y analiza la información del indicador estructural.

Esta base de datos contiene análisis estadísticos y gráficas de los resultados obtenidos de la prueba. Además, contiene información relevante para el diseño de los programas estratégicos de gestión de la conservación y mantenimiento de las carreteras.

Cada archivo de manera detallada contiene información que relevante para la investigación. A continuación, se presenta un desglose de la información que contiene cada hoja usada del archivo de la base de datos:

- “Resumen”: La información general de la carretera estudiada (Clave, nombre de la carretera, tramo, longitud, número de impactos totales realizados, coordenadas geográficas, tipo de superficie, mapa del tramo) y un gráfico circular con los resultados de la deflexión normalizada con el uso de colorimetría para identificar el porcentaje en buenas condiciones (Buena) en verde recordando que es el resultado que este por debajo de 0.400 y el porcentaje de malas condiciones (mala) en rojo el cual debe ser mayor a 0.400 para este tipo de carretera. Así mismo, su deflexión máxima y mínima dada en milímetros.
- “1.1 Campo”: Se presentan los resultados de las deflexiones de los dos impactos y los datos de cada punto como cadenamiento, tipo de superficie, temperatura superficial, temperatura del aire, esfuerzo, coordenadas geográficas y coordenadas UTM.
- “1.2-Normalizada”: Las deflexiones de los dos impactos son promediadas y se normalizan por esfuerzo bajo la fórmula especificada en el manual de métodos de muestreo y prueba de materiales en el capítulo de Determinación de las Deflexiones con Equipo de Impacto en Pavimentos Flexibles SICT, (2017).

- “1.2.1 Zonas Homogéneas”: Se realiza la segmentación de los subtramos de cada tramo mediante el criterio de deflexión normalizada con sus respectivos gráficos dando el total de zonas homogéneas.
- “1.3 Promedio@1km”: Las deflexiones normalizadas de cada kilómetro son promediadas por cada sensor obteniendo un gráfico circular de colorimetría especificando porcentaje de buena y mala deflexión con el resumen de los tramos por cada kilometro
- “1.4 Estadística”: De acuerdo a los intervalos de deflexión y su límite superior (≤ 0.4) y límite inferior (0.00-0.40) se realizan histogramas por números de impacto y por kilómetros para finalmente obtener la distribución de frecuencia de cada intervalo (superior e inferior).
- “1.6 Conclusiones”: Dadas la cantidad de zonas homogéneas del tramo y la estadística del resultado de las deflexiones se da un resultado de deflexión normalizada por cada zona con el mismo criterio de indicador desempeño identificando su condición de acuerdo a las deflexiones si el tramo es bueno, aceptable o no aceptable
- “Tránsito”: De acuerdo a los datos viales de los 4 años previos (desde el 2015) se obtiene información de un TDPA histórico y se obtiene la tasa de crecimiento anual. Igualmente se muestra la clasificación vehicular por el tipo de vehículo ligero, autobuses y pesados
- “Retrocálculo”: Después de analizar los datos de deflexión y obtener un área de la cuenca se realiza un análisis de retrocálculo del cual se obtiene la estratigrafía del pavimento y sus materiales que lo conforman, así como también los módulos de elasticidad en Mpa de cada estrato

Para ver un ejemplo de las hojas “resumen”, “campo” y “retrocálculo” ver anexo 1.

5.2 Selección de tramos

La información de deflectometría que fue proporcionada pertenece a varios segmentos de los corredores carreteros del país. Estos son 15 corredores que se distribuyen a lo largo de todo el país con conexiones portuarias y conexiones fronterizas, por lo que son corredores bastante importantes y relevantes. La gran parte de estos corredores están direccionados a la parte centro de la república mexicana. Su distribución es de la siguiente manera:

1. Transpeninsular de Baja California
2. México - Nogales con ramal a Tijuana
3. Querétaro - Ciudad Juárez
4. Mazatlán - Matamoros
5. México – Nuevo Laredo con ramal a Piedras Negras
6. Veracruz – Monterrey con ramal a Matamoros
7. Manzanillo – Tampico con ramal a Lázaro Cárdenas y Ecuandureo
8. Acapulco- Tuxpan
9. Peninsular de Yucatán
10. Acapulco – Veracruz
11. Puebla – Ciudad Hidalgo
12. Puebla – Progreso
13. Circulo Transístmico
14. Altiplano
15. Del Pacífico

Debido a la amplitud de la base de datos que se estaba manejando y la dificultad de analizar toda la información en conjunto se debía hacer la elección de un segmento de tramo representativo de cada corredor. Estos tramos seleccionados debían tener condiciones variables entre ellos con respecto al tránsito, temperatura, espesores de pavimentos, topografía, entre otras, para alimentar de mejor manera la base de datos y tener información amplia.

El primer criterio usado fue de acuerdo al último registro de Transito Diario Promedio Anual (TDPA) el cual fue obtenido en el año 2019 y la composición vehicular correspondiente a la clasificación A que consta de los vehículos ligeros tipo A2. B que son los autobuses B2 y B3. C que son los vehículos pesados C2, C3, C2-R2, C3-R2, C2-R3, C3-R3, T2-S1, T2-S2, T2-S3, T3-S1, T3-S2, T3-S3, T2-S1-R2, T2-S2-R2, T2-S1-R3, T3-S1-R2, T3-S1-R3, T3-S2-R2, T3-S2-R3, T3-S2-R4, T2-S2-S2, T3-S2-S2, T3-S3-S2. Mediante la inspección de los datos se seleccionó de manera preliminar 15 tramos pertenecientes a estados de la república diferentes, de los cuales se resaltaban 2 tramos: el primer tramo Michoacán – Jalisco la carretera federal número 15 debido a la cercanía de donde se realizó esta investigación,

puesto que se podían supervisar las condiciones del tramo elegido, así mismo, se destacó la carretera federal número 57 Querétaro – San Luis Potosí, debido a su alto tránsito vehicular. Finalmente, se eligieron los siguientes tramos en los cuales se especifica el estado al que pertenece, su TDPA, clave del tramo y composición vehicular.

Tabla 6. Tramos elegidos de manera preliminar con composición vehicular

ESTADO	CLAVE	TDPA	COMPOSICIÓN VEHICULAR		
			A	B	C
Michoacán	MIC015GL-CT1-000.0-014.7	6528	73.0%	3.0%	24.0%
San Luis Potosí	SLP057QE-CT1-124.7-196.3	15277	55.9%	4.9%	39.2%
Veracruz	VER180GG-CT1-186.0-211.5	6702	80.1%	2.9%	17.0%
Guanajuato	GTO045QF-CT1-120.0-142.1	34537	77.7%	2.6%	19.7%
Tabasco	TAB180QJ-CT1-104.0-120.7	16,931	70.3%	4.1%	25.6%
Durango - Sinaloa	SIN040AC-CT1-198.5-294.4	2073	77.4%	5.0%	17.6%
Oaxaca - Chiapas	CHA200IM-CT1-065.0-145.0	2842	70.3%	4.6%	25.1%
Sonora	SON002AA-CT4-000.0-195.8	2148	45.0%	6.9%	48.1%
Chihuahua	CHI045Y4-CT1-238.7-350.0	8621	69.2%	3.4%	27.4%
Nuevo León	NLE085W3-CT1-167.3-223.5	6284	66.9%	4.0%	29.1%
Coahuila	COA040AC-CT1-006.0-033.6	6,284	66.9%	4.0%	29.1%

Yucatán	YUC180I8-CT1-016.2-065.8	6,142	81.8%	2.8%	15.4%
Baja California Sur	BCS001P7-CT1-001.8-044.5	31008	83.6%	0.9%	15.5%
Puebla - Veracruz	PUE140JG-CT1-055.0-083.3	3686	76.2%	3.6%	20.2%
Aguascalientes	AGS045D8-CT1-103.3-123.1	18973	76.2%	3.7%	20.1%

5.2.1 Criterio de selección por temperatura

Los tramos seleccionados previamente fueron montados en un mapa de temperatura media del Portal de Geo información del año 2023 de la Conabio. Este mapa contiene la información estadística de 1800 estaciones que componían el sistema de observación climatológica en el país durante un período de datos que abarca desde 1921 a 1980. Este sistema reconoce seis zonas térmicas en el territorio mexicano: Muy cálida con una temperatura media mayor de 26°C; Cálida con temperatura media de 22° a 26°C; Semicálida con temperatura media de 18° a 22°C; Templada, con temperatura media de 12° a 18°C; Semifría, con una temperatura media de 5° a 12°C y 6) Fría y muy fría (temperatura media menor de 5°C) (Zepeda Vidal , 1990). Los 15 tramos seleccionados de manera preliminar se situaron en el siguiente mapa (ver imagen 21) con el fin de localizarlos de mejor manera por área de temperatura y zona localización.

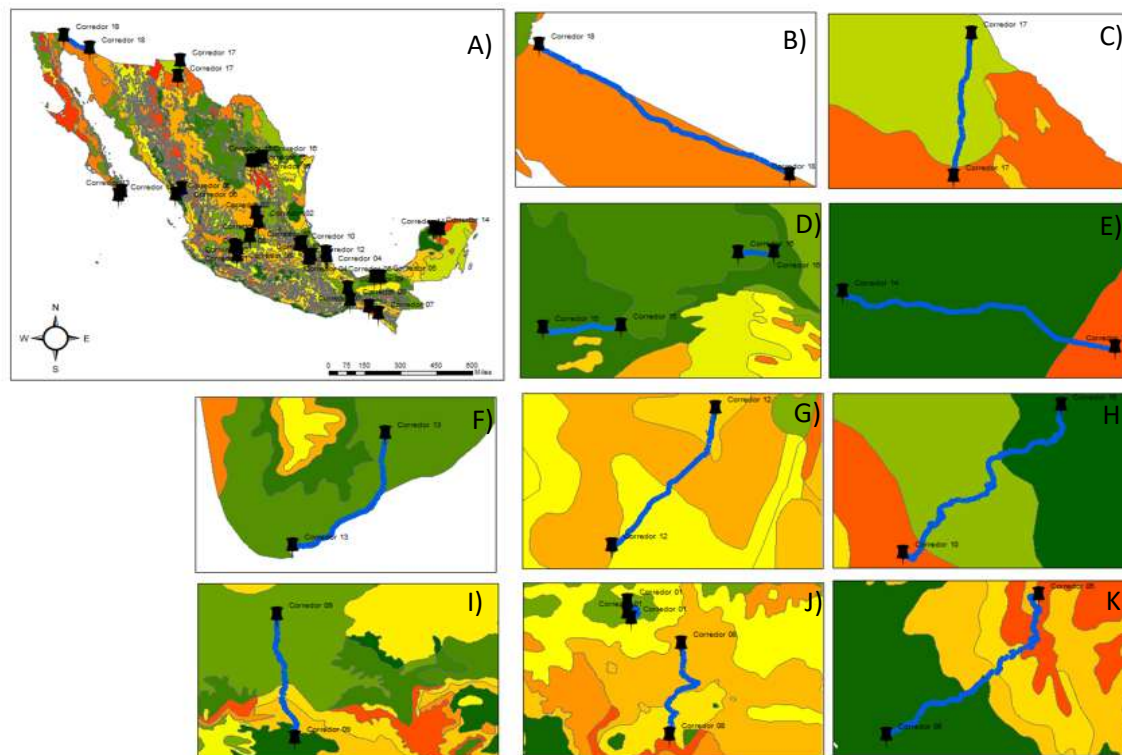


Imagen 21. Mapa de temperatura con tramos preliminares

En la imagen previa se puede ver lo siguiente: A) Mapa de temperatura con 18 corredores carreteros preliminares, B) Vista corredor 18. Sonora, C) Vista corredor 17. Nuevo León, D) Vista corredor 15 y 16. Coahuila, E) Vista corredor 14. Yucatán, F) Vista corredor 13. Baja California Sur, G) Vista corredor 12. Veracruz, H) Vista corredor 10. Oaxaca-Chiapas, I) Vista corredor 09. Tabasco, J) Vista corredor 1 y 8. Michoacán, K) Vista corredor 6. Durango-Sinaloa

A partir de la ubicación de los tramos representativos de cada corredor se puede evidenciar que los tramos están situados en diferentes zonas de temperatura, sin embargo, algunos de ellos, siendo el mismo tramo, atraviesan zonas diferentes de temperatura por lo que no permite la caracterización a una temperatura predominante. De la misma manera, se pudo recalcar que algunos otros tramos estaban situados en zonas de temperatura iguales, pero no se distinguía la influencia de la temperatura en cada uno de ellos.

Así mismo se analiza que el mapa usado es bastante antiguo debido a que la Organización Metereológica Mundial (2023) en su reciente informe predice que entre el año 2023 y 2027

la temperatura media mundial anual cerca de la superficie sea entre 1,1 °C y 1,8 °C superior a la media del período 1850-1900.

5.2.2 Zonas homogéneas

Estos tramos representativos que fueron seleccionados previamente contaban con longitudes de tramo variables, por lo tanto, se debieron seleccionar bajo el criterio de tramos homogéneos usando la deflexión máxima como medida de respuesta para la delimitación de cada tramo homogéneo.

Este método especificado en el apéndice J de la guía de diseño de pavimentos AASHTO 93 se realiza graficando dicha variable de deflexión máxima contra la longitud del proyecto carretero, es decir, su cadenamiento. A continuación, se muestra un ejemplo del procedimiento de la selección de tramos homogéneos con uno de los tramos seleccionados correspondiente al tramo del corredor Morelia – Guadalajara de la carretera federal número 15. Estos resultados ya estaban en la base de datos que fue proporcionada, sin embargo, se realizó la comparación para contemplar los criterios utilizados. Para ver los resultados obtenidos ver anexo 2.

Primero se representó la respuesta del pavimento en el siguiente gráfico: Ver imagen 22.

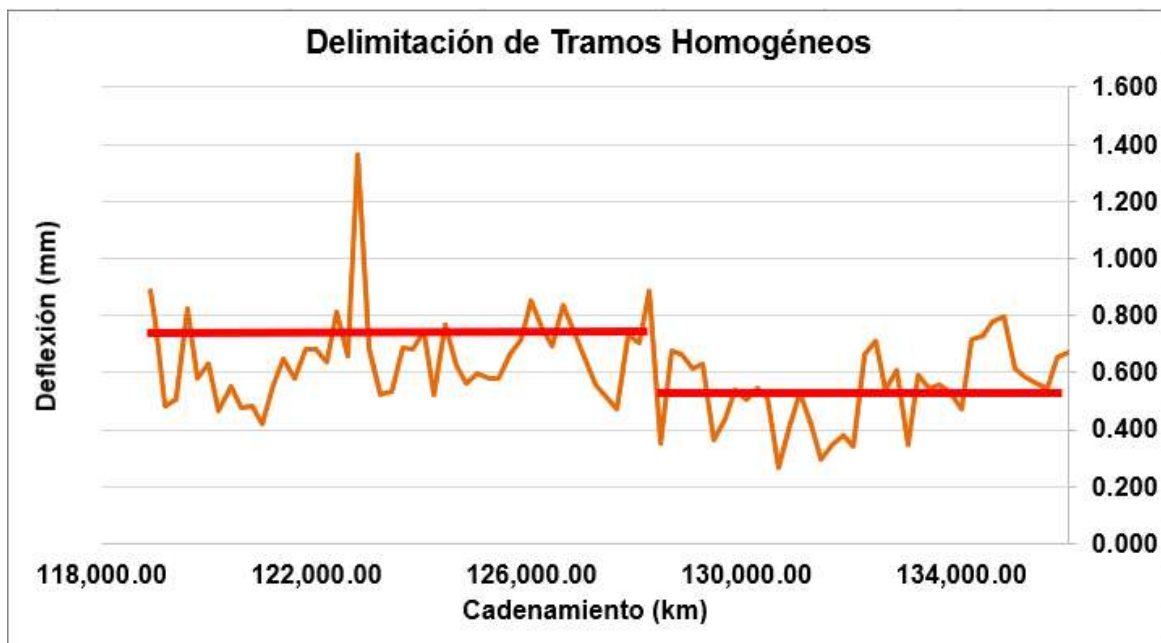


Imagen 22. Gráfico delimitación de tramos homogéneos con criterio de deflexión del tramo Morelia - Guadalajara

Después de obtener las áreas acumulativas totales se representa Z_r la cual es la diferencia en áreas acumuladas. En el siguiente gráfico (imagen 23) se puede observar que cada límite de tramo coincide con el lugar de cambio de pendiente de Z_r (de positiva a negativa o viceversa). Este punto de inflexión indica el inicio del nuevo tramo homogéneo que en el ejemplo corresponde al kilómetro 129+188 tomando en cuenta que, aunque en el gráfico se ven al menos otros dos puntos de inflexión no es conveniente que se registren tramo muy pequeño, por motivos de conservación se debe usar como criterio la delimitación de tramos homogéneos, del orden de 5 kilómetros.

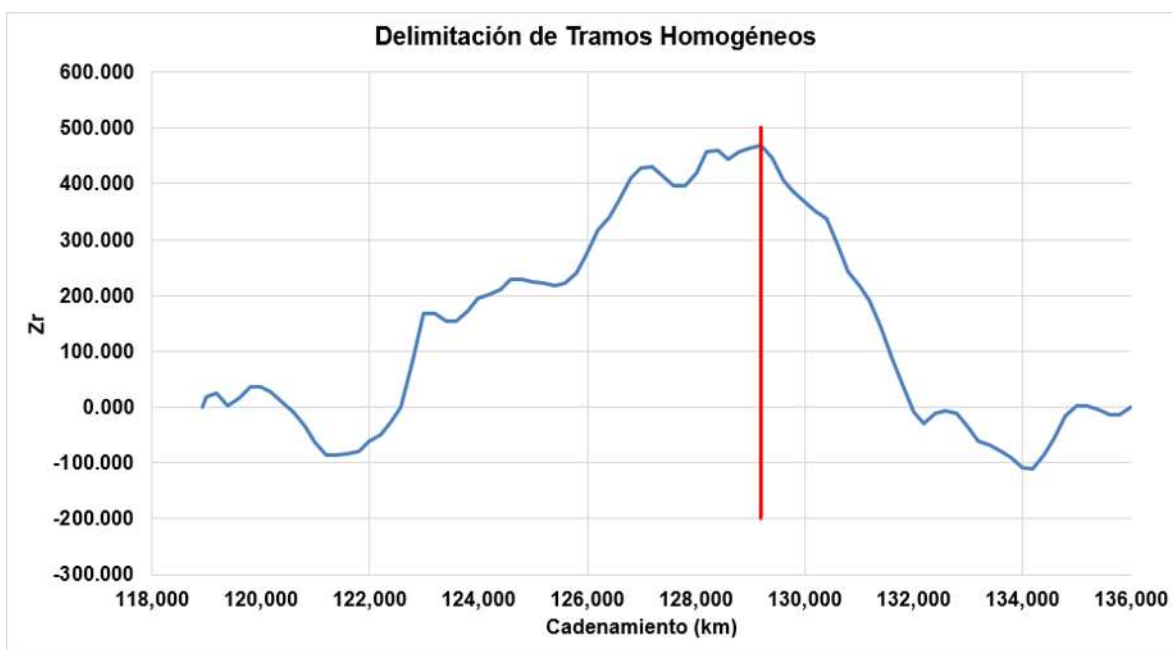


Imagen 23. Gráfico delimitación tramo homogéneo Z_r

En el gráfico de la imagen 24 se puede evidenciar que la comparación del criterio usado en la investigación con los resultados de tramos homogéneos de la base de datos de la Dirección General de Servicios Técnicos, es igual al contemplado. Con ello, se verifica la buena utilidad de los tramos homogéneos propuestos en la base de datos y se continúa haciendo uso de estos gráficos en la investigación.

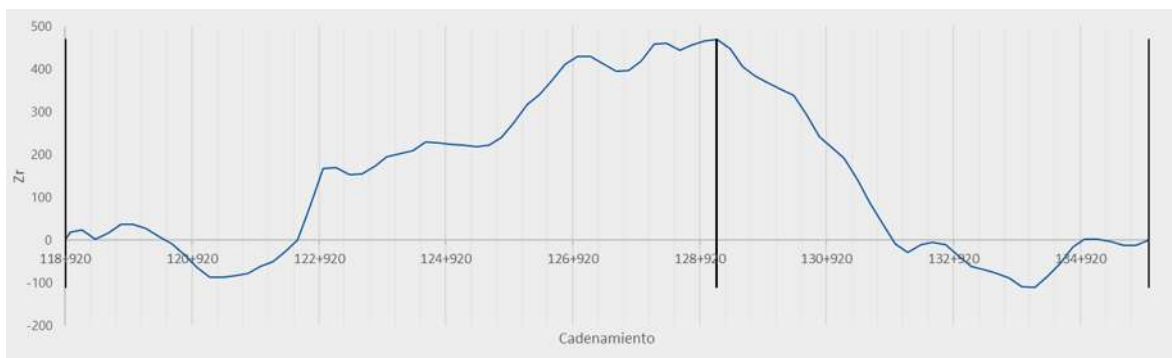


Imagen 24. Gráfico tramos delimitados

Por lo anterior, se establece que los tramos seleccionados previamente no podían ser usados principalmente debido a la falla en su variabilidad de temperaturas y, además, algunos de los tramos seleccionados contaban con tramos homogéneos menores a 5 kilómetros los cuales no podían ser aceptados.

x5.3 Análisis de ecuaciones

Se conocen diferentes métodos utilizados para ajustar o corregir las deflexiones obtenidas a diferentes temperaturas y ajustarlas a una común temperatura de referencia con el fin de poder realizar comparaciones entre diferentes tramos carreteros o entre zonas diferentes de un mismo tramo evaluado.

Estos métodos producían fórmulas las cuales fueron extraídas de la bibliografía para poder observar sus variables de análisis y diferentes coeficientes propuestos con el fin de conocer cuál era la temperatura de referencia propuesta y los criterios de cada fórmula. Además de identificar las variables se conoció la práctica que llevo a la formulación y la relación entre la temperatura y las deflexiones.

Las fórmulas son las siguientes:

1. La fórmula de corrección propuesta en la publicación “Temperature correction of deflections and backcalculated asphalt concrete moduli” en su procedimiento de prueba se basa en la temperatura media de la carpeta asfáltica, es decir, la temperatura efectiva. Kim et al., (1995) bajo la instalación de termopares, los cuales venían acompañados de marcas en el pavimento para la prueba con el FWD, una en el centro del carril y otra en la rodera del carril.

Como resultado de análisis de los gradientes de temperatura, se obtuvo que, aunque las temperaturas al medio día y a las 4:02 pm son las mismas en la superficie la temperatura a profundidad media difiere por 7°C.

El factor de corrección de temperatura para las deflexiones FWD se desarrolló calculando las relaciones de deflexión, dividiendo el valor medido de la deflexión a una temperatura de prueba por la deflexión a una temperatura de 20°C (68°F). Posteriormente se tuvo que desarrollar una curva de regresión para conocer la deflexión representativa para una temperatura específica. Sin embargo, sugirió que la relación se expresa mejor como una función no lineal. Por tal motivo, encontró que la ecuación 6 representa la relación bastante bien.

$$D_{68} = 10^{\alpha(68-T)} * D_T \quad (6)$$

Donde D_{68} es la deflexión ajustada a una temperatura de referencia de 20 °C (68 °F)

D_T es la deflexión medida a cualquier temperatura en Fahrenheit

α es el coeficiente que depende de la posición donde se realizó la medición. Si fue ubicado en la rodera se debe usar un coeficiente de $3.67*10^{-4}*t^{1.4635}$. Si fue ubicado en la línea de centro el coeficiente debe ser $3.65*10^{-4}*t^{1.4241}$

t es el espesor en pulgadas de la carpeta asfáltica

T es la temperatura a profundidad media de la carpeta asfáltica en el momento de medición con el deflectómetro de impacto

2. En la publicación “Temperature correction on falling weight deflectometer measurements” el autor Chen et al., (2000) considera la corrección de las deflexiones por temperatura de los primeros dos sensores debido a que se sostiene que en los resultados de deflexiones del segundo sensor siguen influenciados bajo los efectos térmicos de la carpeta asfáltica y después de sensor 3 las temperaturas son constantes.

Primero se obtuvo la relación de deflexión y temperatura media, igualmente medida con el uso de termopares. De esta relación surgió una fórmula lineal, donde se sustituyó una temperatura de referencia 25°C como el valor x en la línea de tendencia de la relación

obteniendo un valor de deflexión a una temperatura de referencia. Luego, esta deflexión se dividió por las deflexiones recolectadas a otras temperaturas para obtener el factor de corrección.

Una vez se tuvo el factor de corrección se relacionó de manera lineal el factor de corrección y la temperatura a profundidad media de la carpeta asfáltica. Finalmente, las ecuaciones (6 y 7) de corrección de temperatura se establecieron y se presentan a continuación:

$$W_{25}^1 = W_{T_C}^1 * (-0.0319 * T_C + 1.8354) \quad (7)$$

$$W_{25}^2 = W_{T_C}^2 * (-0.0219 * T_C + 1.5607) \quad (8)$$

Donde T_C es la temperatura media del pavimento en el momento de medición con el deflectómetro de impacto en °C

W_{25}^1 es la deflexión en mm del sensor 1 a la temperatura de 25°C

$W_{T_C}^1$ es la deflexión en mm del primer sensor a una temperatura de prueba

W_{25}^2 es la deflexión en mm del sensor 2 a la temperatura de 25°C

$W_{T_C}^2$ es la deflexión en mm del segundo sensor a una temperatura de prueba

3. El autor Straube & Jansen, (2009) como procedimiento, primero utilizó un análisis de regresión para obtener una deflexión de referencia a 20 °C para cada posición de prueba. Posteriormente se realizó otro análisis de regresión para encontrar un factor de ajuste por cada sensor. Se buscaba que las deflexiones medidas se multiplicaran por un factor de normalización de temperatura para obtener las desviaciones a la temperatura de referencia de 20 °C. De tal manera la fórmula es (ver ecuación 9):

$$D_{20,i} = (a - b * T) * DT, i \quad (9)$$

$D_{20,i}$ es la deflexión del geófono i a 20°C

a,b Son los factores que se establece el autor mediante una tabla en la cual dependiendo de la posición del geófono, la temperatura y espesor de la carpeta asfáltica se especifica el factor

T es la temperatura de la carpeta asfáltica a 5 cm

DT_i es la deflexión medida con el FWD a una temperatura T de la capa de CA del geófono i

4. La metodología propuesta por Pérez et al., (2015) del IMT para encontrar una ecuación de ajuste, después de realizar bastantes pruebas de campo y comparativa de varias ecuaciones de la literatura, consta de primero establecer un factor de corrección (ver ecuación 10) el cual se divide las deflexiones a la temperatura de prueba por las deflexiones a la temperatura de referencia (en este caso, 20°C).

$$FC = \frac{D_n}{D_{n20^{\circ}C}} \quad (10)$$

En donde D_n es la deflexión a cualquier temperatura en el sensor n y D_{n20°C} es la deflexión a la temperatura de referencia.

Con esta relación realizada por se obtiene la fórmula para las diferentes temperaturas superficiales en uno de los sensores a partir de un análisis lineal del coeficiente de corrección vs temperatura superficial. De esta manera y con la comprobación de que hay un buen índice de correlación se demuestra la certidumbre. Se presenta la fórmula de ajuste en la imagen 25:

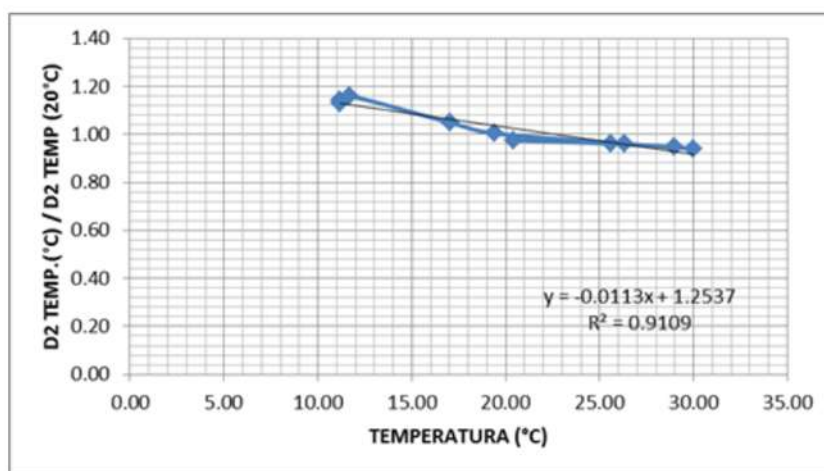


Imagen 25. Presentación de ecuación propuesta por IMT. Fuente: (Pérez, Garnica, García, & Cruz, 2015)

5. La publicación “Temperature correction of deflections and backcalculated elasticity moduli determined from falling weight deflectometer measurements on asphalt pavements” en un gráfico traza las deflexiones medidas en la posición de los sensores contra la temperatura de prueba y una regresión se deriva de esta curva. En esta regresión se puede observar que si hay una dependencia lineal.

Luego Březina et al., (2022) obtienen los coeficientes de corrección de temperatura para cada sensor a la temperatura de referencia de 20 °C usando la fórmula de deflexión a 20°C entre la deflexión a temperatura de prueba presentada de la siguiente manera (ver ecuación 11).

$$Cc = \frac{D_{20}}{D_T} \quad (11)$$

Todos los coeficientes de corrección, calculados a partir de las mediciones en todas las secciones de prueba, se agruparon y se derivó una curva de regresión final de la cual se obtiene un buen índice de correlación y se deriva la fórmula final. Este mismo procedimiento fue aplicado para cada uno de los sensores de los cuales se derivaron las ecuaciones 12, 13, 14 y 15 de corrección de temperatura de cada sensor:

$$d_{0,20,cor} = d_{0,T} * (1 + 0.017817 * (20 - T)) \quad (12)$$

$$d_{300,20,cor} = d_{300,T} * (1 + 0.012116 * (20 - T)) \quad (13)$$

$$d_{600,20,cor} = d_{600,T} * (1 + 0.007555 * (20 - T)) \quad (14)$$

$$d_{900,20,cor} = d_{900,T} * (1 + 0.003958 * (20 - T)) \quad (15)$$

6. El (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), (2003) en la norma 6.3 de la Instrucción de Carreteras de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento Español, recomienda aplicar un factor de corrección en las deflexiones, cuando la temperatura del pavimento es mayor o menor a 20° C. Sin embargo, resalta que no deberán hacerse las medidas con temperaturas del pavimento inferiores a 5 °C, para prevenir hacerlo con un pavimento helado y tampoco hacerse con más de 30 °C si el pavimento tiene 10 cm o más de espesor de la carpeta asfáltica o con más de 40 °C si la carpeta tiene menos de 10 cm de espesor ya que no se podría obtener una deflexión fiable.

Proponen una normalización por temperatura que resulta del producto de las deflexiones de prueba y el coeficiente propuesto en la norma.

La norma propone 3 coeficientes de corrección diferentes dependiendo del espesor de la carpeta asfáltica y su nivel de fisuramiento:

Para pavimentos poco fisurados y espesor de carpeta asfáltica ≥ 10 cm usar la ecuación 16

$$C_t = \frac{200}{3t+140} \quad (16)$$

Para pavimentos muy fisurados usar la ecuación 17

$$C_t = \frac{2t+160}{3t+140} \quad (17)$$

Para pavimentos con espesor de carpeta asfáltica < 10 cm o pavimentos totalmente fisurados usar la ecuación 18

$$C_t = 1 \quad (18)$$

No obstante, para pavimentos que no presentan fisuras o pavimentos recientes se ve restringido su uso.

7. La Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimentos 1993, publicada por la AASHTO, (1993) en el capítulo 5 Método de Rehabilitación Sobre Carpetas, propone una corrección por temperatura a los valores de deflexión bajo el plato de carga (d0), únicamente considera relevante la deflexión debajo del plato de carga, por lo cual los demás sensores no se corrigen por este efecto.

El factor de ajuste de (d0) está basado en la relación de deflexiones a 68°F (20°C) entre la deflexión en el sensor 1 a temperatura de evaluación en °F. Este factor de ajuste puede ser multiplicado por la deflexión para obtener su normalización. Además, hace uso de dos gráficas mediante las cuales se pueden obtener las fórmulas de corrección de las deflexiones medidas a diferentes temperaturas en el pavimento dependiendo si son pavimentos con bases hidráulicas o estabilizadas con asfalto y/o cal o si son pavimentos con bases estabilizadas con cemento. Ver imágenes 26 y 27

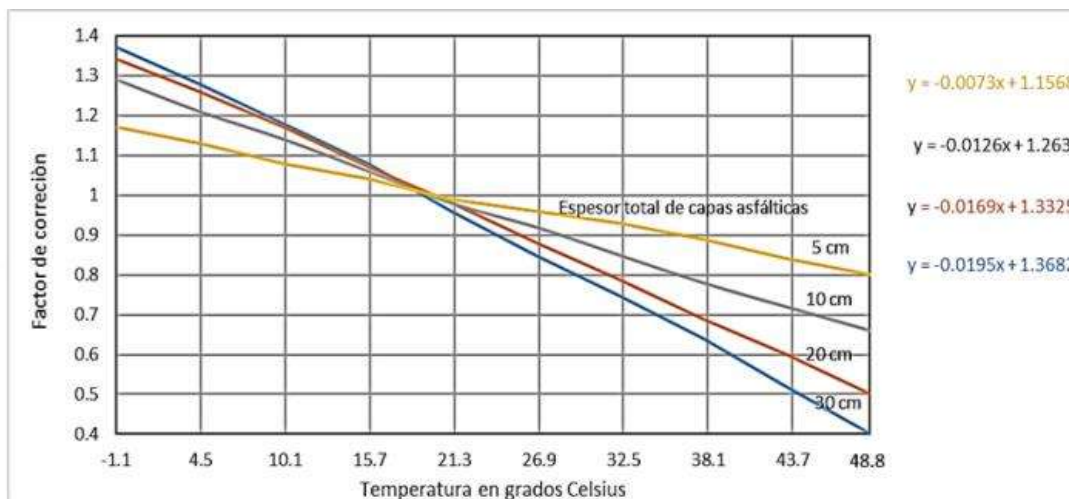


Imagen 26. Gráfico para determinación del factor de corrección de deflexiones por temperatura para pavimentos con bases hidráulicas con bases hidráulicas o estabilizadas con asfalto y/o cal. Fuente: SICT, 2017

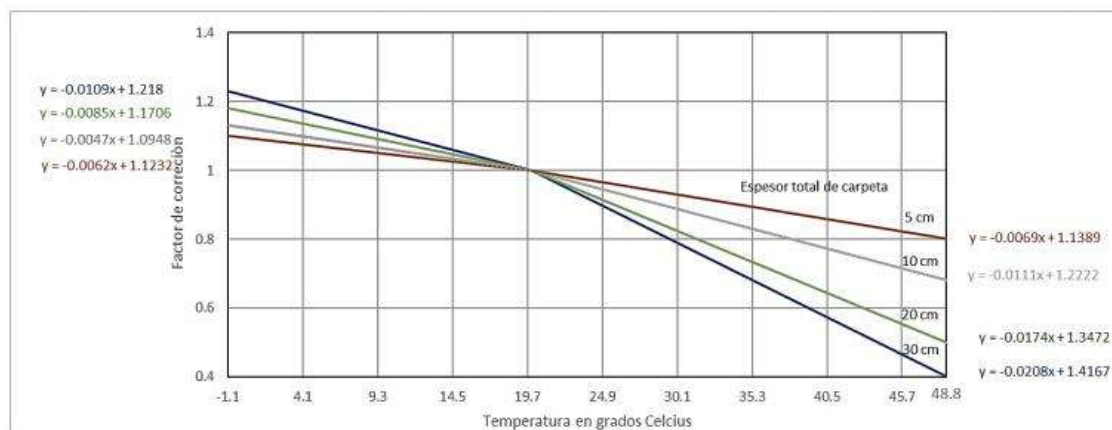


Imagen 27. Gráfico para determinación del factor de corrección de deflexiones por temperatura para pavimentos con bases estabilizadas con cemento. Fuente: SICT, 2017

Esta metodología de la AASHTO es igualmente utilizada en el manual de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes en el apartado “Determinación de las Deflexiones con Equipo” M·MMP·4·07·022/17. En este manual se muestran los gráficos mostrados anteriormente de donde se extrae la fórmula siendo la metodología de corrección por temperatura usada para las deflexiones medidas en muchos proyectos de México en caso de no hacer referencia a otra normativa.

8. El manual publicado en 1983 por el Instituto del Asfalto, (1983) en el capítulo 4 “Procedimiento de Deflexión” presenta una gráfica para la corrección por temperatura. En

esta gráfica mostrada en la imagen 28 se toma como temperatura de referencia 70 ° F (21° C).

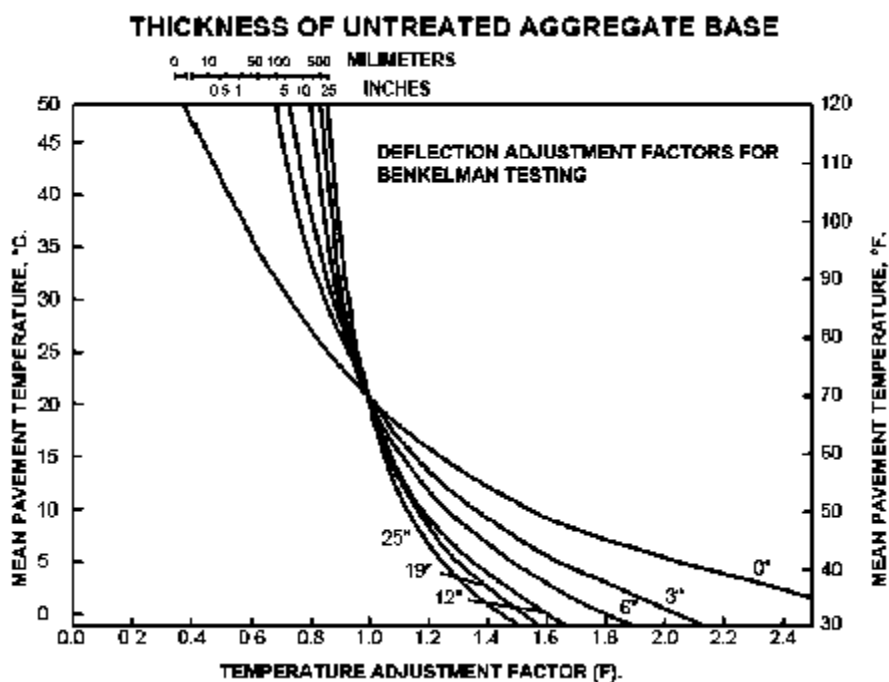


Imagen 28. Gráfico de factor de ajuste de temperatura. Fuente: (Asphalt Institute, 1983)

5.4 Comparativa de ecuaciones con temperatura superficial

De las fórmulas mencionadas en el apartado anterior se realizó un comparativo de las ecuaciones para observar su comportamiento. Con la información de deflectometría proporcionada se tomó un tramo en el que su espesor de carpeta asfáltica tuviera variación entre menos de 10 centímetros de espesor y mayor a 10. Pues varios de los autores mencionaban la importancia de estudiar la influencia de la temperatura en capas asfálticas robustas y delgadas, principalmente la norma española hace énfasis en este espesor de 10 centímetros por lo cual era importante tener esta variabilidad de espesor.

Este procedimiento fue aplicado en 5 tramos para realizar la comparativa de ecuaciones: el tramo del estado de Aguascalientes carretera federal número 45, un tramo de la carretera federal 57 en el estado de San Luís Potosí, dos tramos de la carretera 15 pero en estados diferentes, uno del estado de Michoacán y otro de Jalisco y finalmente el tramo que con el fin de ejemplificar el ejercicio se muestra a continuación. Es el tramo federal número 180 en la carretera Campeche – Mérida. Este es un tramo interesante puesto que en las pruebas se

registraron temperaturas bastante altas con un promedio de temperatura superficial del tramo de 48.7°C, además de que en dos segmentos del tramo se tienen espesores de carpeta asfáltica diferentes. Del kilómetro 62+001 al 86+798 tiene un espesor de 9.5 cm la capa asfáltica y del kilómetro 87+000 al 94+996 tiene 10.8 cm de espesor.

Con el uso de 7 fórmulas de la bibliografía se normalizó la deflexión y se muestran las deflexiones sin normalizar por temperatura de este tramo de Campeche, así como los límites de aceptación especificados en la norma de la SICT N·CSV·CAR·1·03·010/17 para la determinación de las deflexiones de un pavimento en autopistas y corredores carreteros siendo 0.400 el límite aceptable. Ver imagen 29.

Para ver los resultados del gráfico mostrado en la imagen 29 y los gráficos de los otros 4 tramos mencionados ver anexo 3.

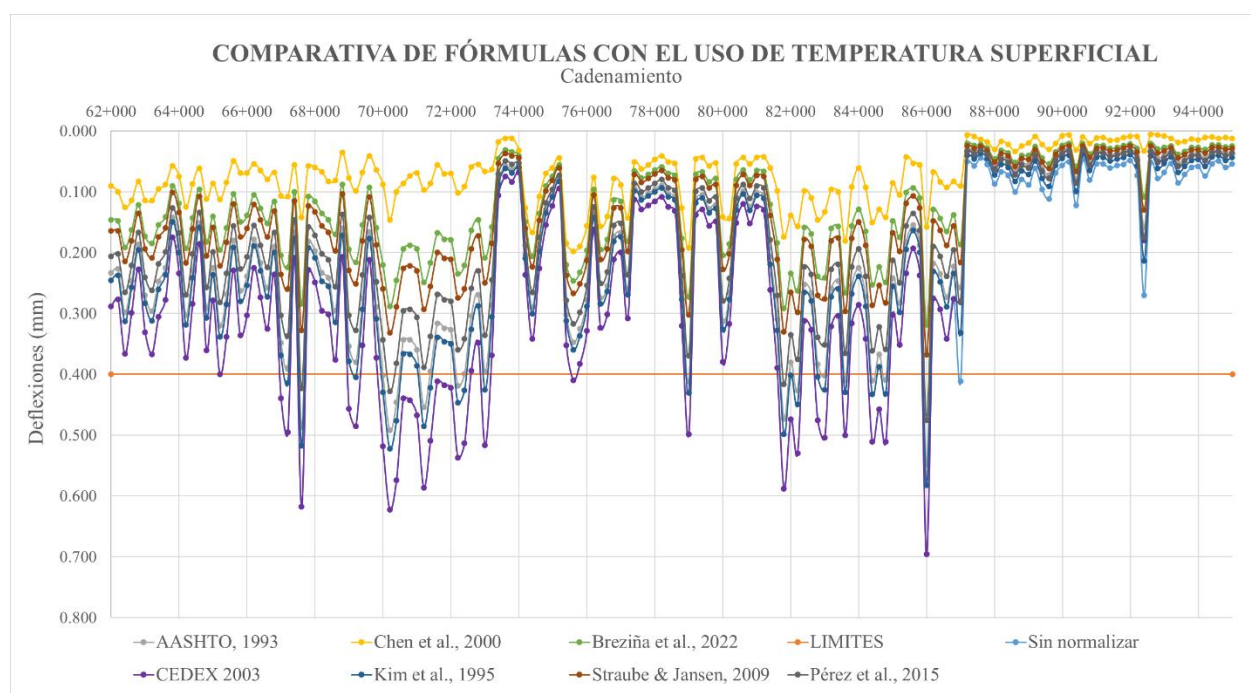


Imagen 29. Comparativa de ecuaciones con el uso de temperatura superficial del tramo Campeche - Mérida

La norma española en el primer segmento, donde había un espesor de carpeta menor a 10 centímetros su coeficiente de corrección era de 1 por lo cual no hay corrección ni muestra diferencia frente a las deflexiones sin normalizar. Por ende, se sobrepone la línea de color morado correspondiente a la norma en este segmento.

Se evidenció la importancia de corregir las deflexiones por temperatura debido a que algunas deflexiones estaban en una zona de rechazo y al normalizarse entran en una zona de aceptación. Sin embargo, un patrón de todas las fórmulas es que cuando las deflexiones son grandes (mayores a 0.400) se amplía la diferencia de corrección entre fórmula y fórmula. Por ejemplo, del km 70+000 al km 73+000 las deflexiones sin normalizar por temperatura están arriba del valor de 0.400 mm y es donde se registra una diferencia de corrección de las fórmulas. Este mismo incremento de deflexiones sucede en el segmento del gráfico del km 82+000 al km 87+000 e igualmente es cuando se ve más dispersión en la diferencia de la corrección por temperatura de cada fórmula.

Entre las distintas fórmulas comparadas se observa que el autor Chen presenta la ecuación que mayor corrección presenta frente a las demás y se aleja bastante del comportamiento de las deflexiones, es la única fórmula en la que no se destacan los altos y bajos de las deflexiones. Su corrección es bastante alejada de las deflexiones sin normalizar. Las otras fórmulas siguen un mismo patrón de comportamiento

La fórmula de la AASHTO sigue una tendencia muy similar a las deflexiones sin normalizar, sin embargo, algunas deflexiones son beneficiadas en cuanto incrementa levemente la rigidez, pasando a un criterio de cumplimiento. La fórmula planteada por el Instituto Mexicano del Transporte tiene una corrección media frente a las demás fórmulas sigue perfectamente el comportamiento de las deflexiones, destacando las más altas y más bajas. Finalmente se destaca que la fórmula que más corrige sin perder la tendencia y comportamiento de las deflexiones de campo es la de Breziña; así como también la más cercana al comportamiento de las deflexiones sin normalizar era la de Kim, pero esta última su rango frente a las deflexiones no normalizadas es lo suficientemente bueno para que algunas deflexiones ya estén dentro de un criterio de aceptación y se resalte la importancia de normalizar por temperatura

5.5 Segmentación de tramos

Posterior a conocer los 15 corredores carreteros se eligió los tramos representativos de cada corredor con el fin de que la información de deflectometría y estratigrafía de la base de datos proporcionada fuera usada para los análisis posteriores. Los corredores al ser carreteras importantes por transporte de mercancía y sus conexiones fronterizas poseen de longitudes

bastante considerables que en comentarios anteriores se hizo énfasis de segmentar estos tramos con longitudes más cortas para poder realizar un análisis más detallado. Además de que el tramo elegido representaría la mayoría de las condiciones de ese corredor carretero del que pertenece.

Para la selección de estos segmentos se busca abarcar los mayores rangos de temperaturas y seleccionar vialidades que pertenecieran a distintos grupos de temperatura. Por ello mediante el uso del mapa de temperatura media de la Conabio proporcionado en el portal de geoinformación, se conocieron las distintas temperaturas registradas del país. No obstante, surgieron problemáticas ya que la información recolectada para la elaboración de este mapa era de los años 1921 al 1980, información que ha cambiado bastante hasta el año de estudio (2023); además de que la temperatura media no representa de buena manera la amplitud de las temperaturas presentadas en estados de la república pues algunos estados tienen temperaturas muy extremas en algunos meses con respecto de otros estados y pueden ser considerados como valores atípicos ocupando un conjunto de datos muy grande. Es decir, este mapa de temperatura al representar la media aritmética la cual es una medida sensible a los valores atípicos, varía su valor en función de la amplitud de los datos y aquellos valores de temperatura que no son cercanos al resto de los datos afectan en el valor de la media.

Para relacionar de mejor manera las temperaturas del país se optó por extraer los mapas de temperatura máxima y mínima para combinarlos ambos mapas y poder encontrar una correlación de temperaturas entre estados. Por una parte, el mapa de temperatura mínima representa la temperatura mínima registrada en el mes más frío (enero) realizando la división en zonas térmicas: semicálida, templada, semifría, fría y muy fría. Y, por otra parte, el mapa de temperatura alta representa la temperatura más alta del mes más caliente, seccionándolo por rangos que comprenden: muy cálida, cálida, semicálida, templada, semifría, fría y muy fría.

Se elaboró el mapa (ver imagen 30) en un programa de información geográfica llamado ArcGis en el que se superpusieron ambos mapas. El resultado fue el mostrado en la siguiente figura:

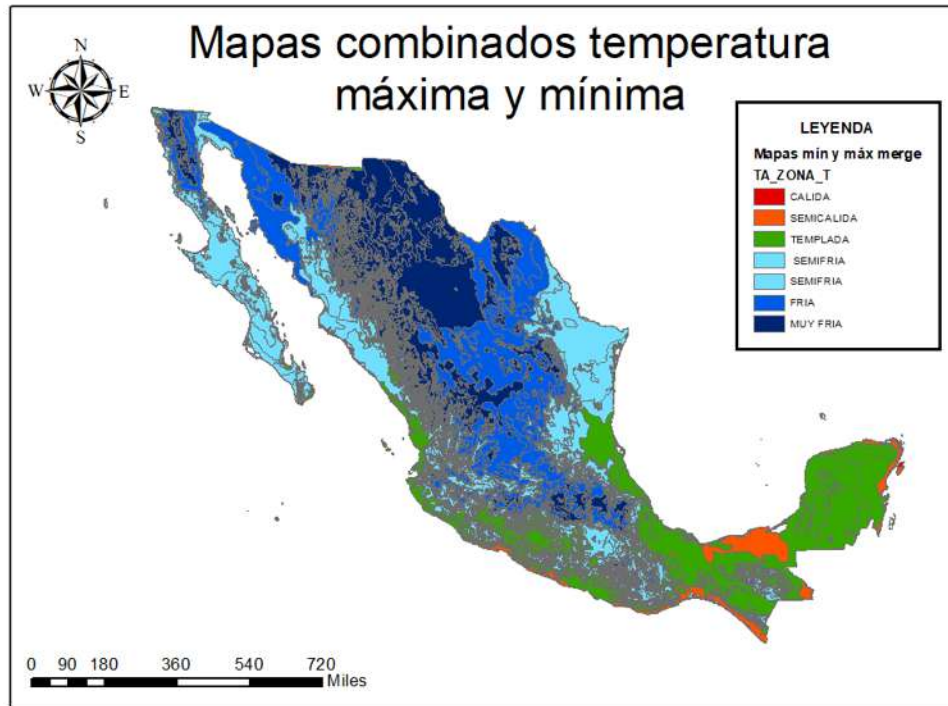


Imagen 30. Mapas combinados de temperatura máxima y mínima

Finalmente, no se pudo distinguir una relación entre estos mapas, sin embargo, se continuó la investigación que dio paso a observar un fenómeno interesante, pues mediante la observación del plano topográfico se encontraron muchas zonas montañosas, donde se veían los parteaguas para diferenciar las temperaturas.

Para analizar este fenómeno se hizo uso de un mapa geológico elaborado por el INEGI. En este mapa mostrado en la imagen 31 se distinguen las 7 principales cadenas montañosas en México: Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental, Sierra Madre de Chiapas, Sierra Madre del Sur, Eje Volcánico Transversal, Sistema Montañoso de Baja California y el Altiplano de México.

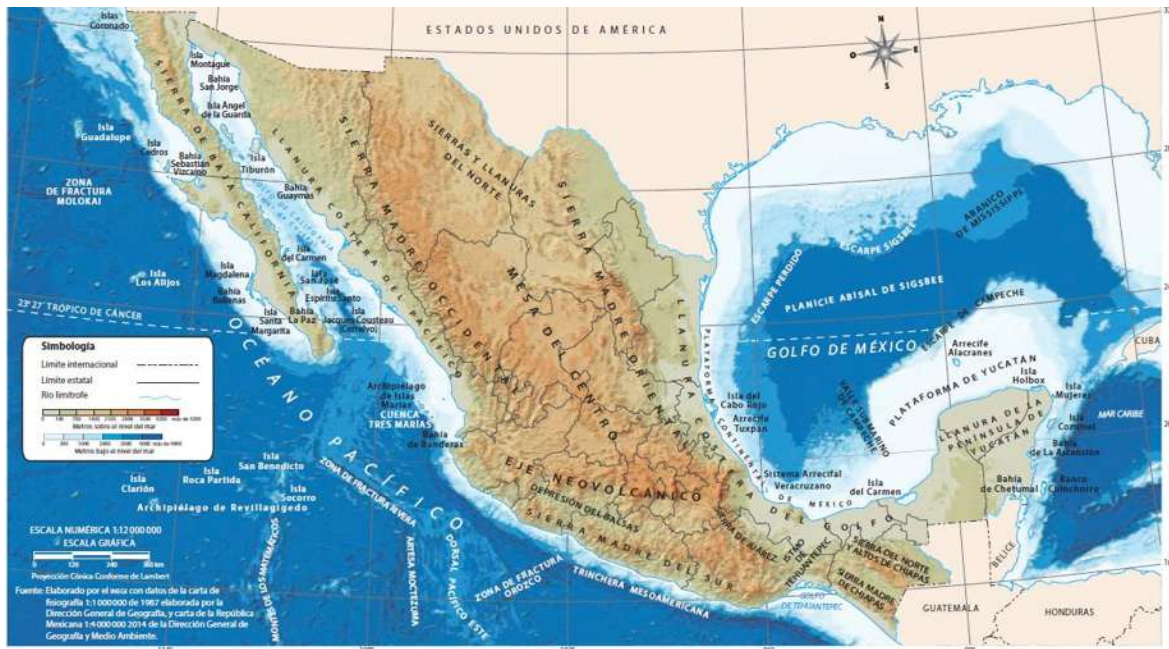


Imagen 31. Mapa geológico de México. Fuente: INEGI

Las zonas montañosas se vinculan bastante a la humedad y las temperaturas presentadas en varios estados del país. Por ejemplo, los estados cercanos a la sierra madre oriental son destacados por su clima principalmente seco. Así mismo, se destaca la aridez del Altiplano. La Sierra Madre Occidental, el Eje Volcánico Transversal y la Sierra Madre del Sur son un obstáculo para las masas de aire polar que incursionan desde el norte. En consecuencia, el litoral del Pacífico que está protegido por estas sierras es más caluroso en épocas frías que del lado del golfo (Salinas Rodríguez, 2018).

Esta topografía y ubicación geográfica del país dan como resultado un mosaico climático muy grande. Entonces, se manejó la Temperatura Media Promedio por Entidad Federativa y Nacional del año de estudio (2020) dada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Bajo esta herramienta se extrajeron las temperaturas medias de enero a diciembre de los 32 estados con el fin de observar que estados contaban con un comportamiento de temperaturas similar debido a la cercanía o por sistemas climáticos similares.

Se realizó un gráfico comparativo de esta información mostrado en la imagen 32:

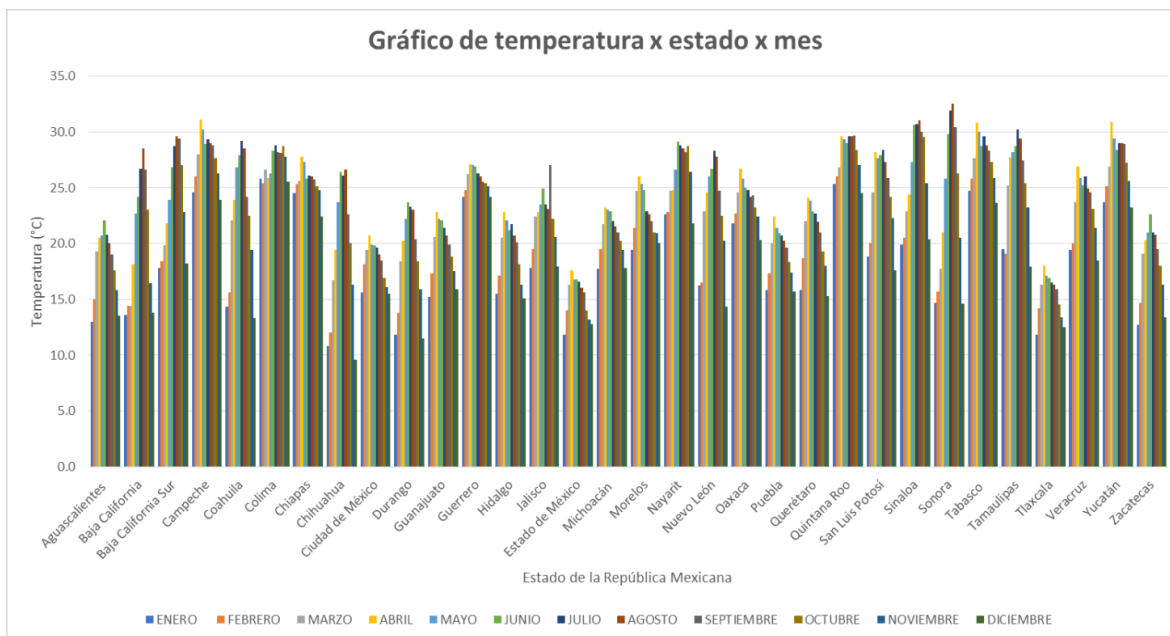


Imagen 32. Gráfico de temperatura de las entidades federativas por mes

Se destacan comportamientos de temperatura iguales de algunos estados a lo largo del año, por ejemplo, se puede observar en el gráfico que Tlaxcala, Estado de México y Ciudad de México tienen comportamientos de temperatura iguales en todo el año. Del mismo modo se buscó estandarizar tramos cercanos o con temperaturas medias similares. Teniendo como resultado que los estados que tenían comportamiento de temperaturas extremadamente parecidas eran: Campeche, Tabasco y Yucatán, Hidalgo y Guanajuato, Estado de México, Tlaxcala y Ciudad de México, Aguascalientes, Zacatecas y Querétaro y, por último, Michoacán y Jalisco.

Con ello, se podía identificar solo un tramo de la base de datos que pasara por alguno de estos estados y no repetirse temperaturas ya que se estarían tomando temperaturas muy similares. Sin embargo, al estar cercanos estos estados eran correspondientes al mismo corredor carretero, pero lo anterior demuestra que la selección de un tramo que pertenezca a estos estados relacionados asegura ser un comportamiento similar de temperatura a los otros mencionados en el mismo grupo.

De la misma herramienta de la CONAGUA se registró una temperatura media nacional en el año 2020 de 22.4 °C. La cual es la temperatura predominante de ese año en el país, ya que abarca todos los estados considerando que su rango de datos es adecuado para tomar la

estadística de media aritmética pues no es tanta la amplitud de los datos. Esta temperatura es la que mejor representa las temperaturas presentadas en el país a lo largo del año por lo cual será fundamental tomarla como temperatura de referencia. Con ello, de manera preliminar, se evidencia que tomar 20 °C como temperatura de referencia para la corrección de las deflexiones es un valor un poco alejado a las condiciones térmicas del país. Pues un año antes del 2020 se registró una temperatura media nacional igual de 22.4 °C y en el 2021 de 22.2 °C.

Conociendo la dificultad de segmentar los tramos por temperatura debido a que las condiciones climáticas de México han variado considerablemente y en un mismo estado se pueden abarcar varias temperaturas. Se considera que la climatología realmente representa el funcionamiento del sistema climático de manera zonificada, sus variaciones, extremos e influencias por fenómenos meteorológicos que son muy cambiantes a lo largo del tiempo y, de una manera más estable, se logra hacer una segmentación.

Existe un tipo de clasificación climatológica por la escala de Köppen, es una clasificación creada por el climatólogo alemán Wladimir Köppen en 1884. Este sistema de Köppen se basa en que la vegetación natural de cada zona la cual le da la posición climática, por lo que establece muy bien los límites entre un clima y otro, teniendo en cuenta la distribución de la vegetación. Los parámetros para determinar el clima de una zona bajo esta clasificación son las temperaturas y precipitaciones medias anuales y mensuales, y la estacionalidad de la precipitación (Gobierno de Navarra, 2014). Lo anterior describe de manera más precisa la clasificación climática tomando en cuenta todos sus factores meteorológicos de los estados a estudiar.

La escala de Köppen divide los climas del mundo en cinco grupos principales (Gobierno de Navarra, 2014):

Grupo A: tropical. El cual dependiendo de su régimen de precipitaciones su segunda letra puede ser f (Ecuatorial), m (Monzónico), w (Sabana).

Grupo B: seco. La segunda letra indica el grado de aridez: s (Estepario), w (Desértico). Una tercera letra indica el régimen de temperaturas: h (Cálido) tomando en cuenta que la

temperatura media anual es superior a 18°C, k (Frío) la temperatura media anual no es superior a 18°C.

Grupo C: climas de latitudes medias. La segunda letra explica el régimen de lluvias: s: Verano seco. w: Invierno seco. f: Húmedo. Una tercera letra indica el comportamiento de las temperaturas en verano: a: Subtropical. b: Templado. c: Frío.

Grupo D: clima continental (inviernos muy fríos)

Grupo E: clima polar

En México la mayoría de las zonas se representan por los climas A, B y C; los climas D no existen debido a que es un país tropical en su mayoría y los climas E solo se encuentran en las partes más altas de las grandes montañas del centro del país, que debido a su altitud presentan temperaturas menores a los 10°C. Por diversidad de microclimas con que se cuenta en el país, el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) con el mapa del clima del país basado en la clasificación climática de Köppen, desarrollado por García (1998), para la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), adaptó el mapa.

Este mapa se presenta en una plataforma denominada “Sistema de información climática para el diseño de carreteras” (SICLIC) donde se identifica tanto la temperatura media (por regiones), cambios en el ciclo del agua (precipitación, evaporización, etc.), radiación solar, aumento de la temperatura (mayor presencia de sequías, olas de calor prolongadas, etc.), incremento del número de fenómenos hidrometeorológicos extremos, etc. (Mendoza Sánchez et al. 2021).

En este mapa se puede utilizar la información climática y superponer la información de las capas de carreteras, para identificar en qué zona del clima se encuentra el tramo de carretera. Entonces a partir de esta clasificación, se eligieron los segmentos representativos de cada corredor carretero. Finalmente, estos son:

Tabla 7. Tramos representativos de los 15 corredores carreteros nacionales

Nombre de la carretera	Clave	Perteneciente a corredor carretero
Morelia – Guadalajara	JAL015E5-CT1-118.9-136.0	México – Nogales con ramal a Tijuana
Querétaro - San Luis Potosí	SLP057QE-CT1-124.7-196.3	México – Nuevo Laredo ramal Piedras Negras
Zacatecas - Durango	ZAC045Y2-CT2-004.8-024.4	Querétaro – Ciudad Juárez
Poza Rica - Veracruz	VER180GG-CT1-186.0-211.5	Veracruz – Monterrey con ramal a Matamoros
Campeche - Mérida	CAM180I8-CT3-050.2-097.0	Puebla – Progreso
Durango - Mazatlán	SIN040AC-CT1-198.5-294.4	Mazatlán - Matamoros
Puebla - Huajuapán de León	PUE190BA-CT6-029.9-055.0	Puebla – Ciudad Hidalgo
San Luis Potosí - Guadalajara	JAL080AG-CT4-085.4-152.6	Manzanillo – Tampico con ramal a Lázaro Cárdenas y Ecuandureo
Coatzacoalcos - Salina Cruz	VER185BC-CT1-071.4-139.9	Círculo Transístimico
Pachuca - Tuxpan	VER130AT-CT1-186.6-197.0	Acapulco – Tuxpan
México - Cuautla	MOR115G5-CT1-000.0-007.1	Acapulco – Veracruz
Los Reyes - Zacatepec	TLA136QB-CT1-096.0-112.0	Altiplano
Cabo San Lucas - La Paz	BCS001P7-CT1-001.8-044.5	Transpeninsular de Baja California

Chetumal - Puerto Juárez	QOO307D2-CT1-302.5-320.0	Peninsular de Yucatán
Tapanatepec - Talismán	CHA200IM-CT1-046.0-065.0	Del Pacífico

Parte de la elección de estos segmentos viales es de acuerdo al argumento de que los tramos seleccionados estén situados en distintas zonas climáticas para poder abarcar la mayor cantidad de climas presentados en la república nacional. Por tal motivo, el siguiente mapa (ver imagen 33) se muestra la ubicación de los tramos, realizado en un programa de sistema de información geográfica llamado ArcGis en el que se usó el mapa de México de la CONABIO bajo la escala climática de Köppen.



5.6 Relación de temperatura superficial vs deflexión máxima

Se realizó la comparación de las dos variables: temperatura superficial tomada en el momento de ejecución de la prueba y la deflexión del sensor 1. Esto con el fin de observar el comportamiento de las deflexiones en función de la temperatura. Pues (Chen et al. 2000) encuentran una relación lineal bastante buena (coeficiente de correlación de 0.9) entre estas dos variables. Sin embargo, de los tramos seleccionados se hizo esta relación usando las deflexiones en el sensor 1 normalizadas por fuerza y la temperatura superficial, pero contrario a lo reportado a la literatura, ninguno de los corredores tuvo un buen índice de correlación lineal. Pues la correlación de estas dos variables se representa con el coeficiente de correlación de cada corredor mostrado en la tabla 8.

Tabla 8. Coeficientes de relación de temperatura superficial vs deflexión máxima

Corredor carretero	Coeficiente de correlación
1. Morelia - Guadalajara	0.022
2. Querétaro - San Luis Potosí	0.128
3. Zacatecas - Durango	0.006
4. Poza Rica - Veracruz	0.045
5. Campeche - Mérida	0.218
6. Durango - Mazatlán	0.019
7. Puebla - Huajuapán de León	0.191
8. San Luis Potosí – Guadalajara	0.018
9. Coatzacoalcos - Salina Cruz	0.0001
10. Pachuca – Tuxpan	0.084
11. México – Cuautla	0.011
12. Los Reyes – Zacatepec	0.005
13. Cabo San Lucas - La Paz	0.093
14. Chetumal - Puerto Juárez	0.038
15. Tapanatepec – Talismán	0.001

Los 15 corredores después del análisis de relación de las dos variables se mostraba una dispersión similar a la del corredor 13 en la carretera federal 1. Esta dispersión se muestra a continuación en la imagen 34:

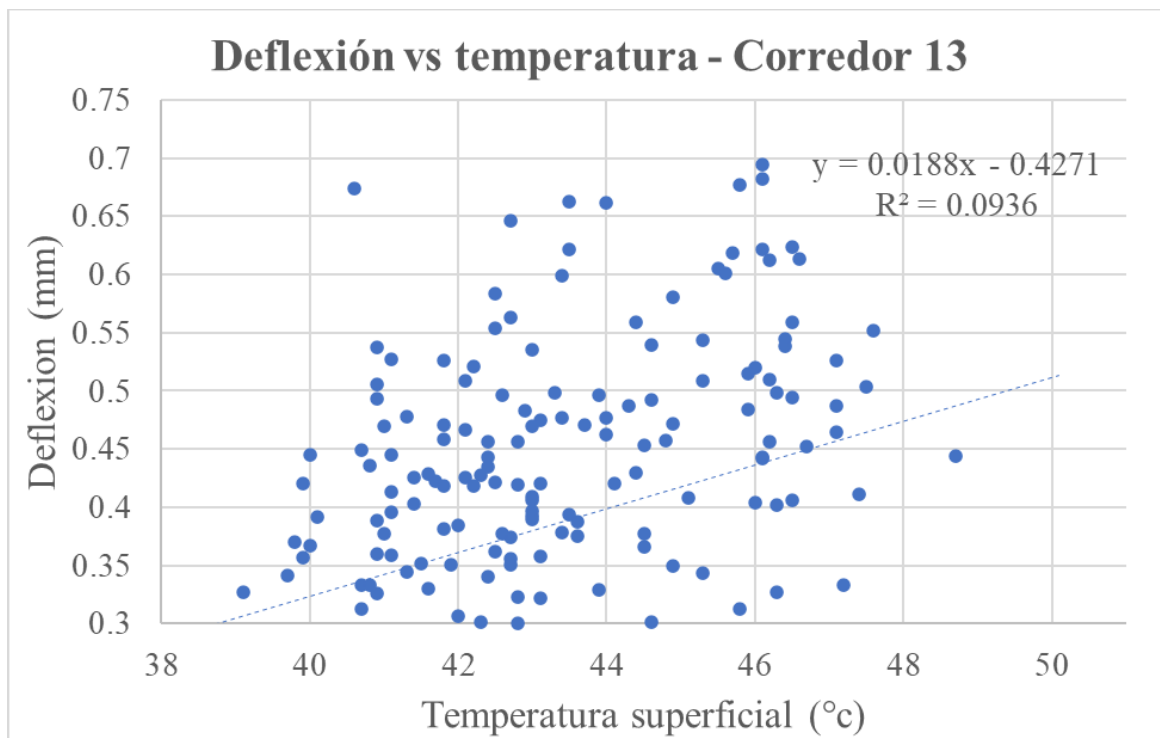


Imagen 34. Gráfico de relación deflexión vs temperatura superficial del corredor 13

En el grafico anterior se destaca una alta dispersión de la relación entre deflexión del primer sensor y temperatura superficial del pavimento. Por esta alta dispersión su relación con un ajuste lineal es bastante malo al igual que con otros ajustes como polinómico ($R^2=0.0974$) y logarítmico ($R^2=0.0947$). Pues bajo la afirmación del autor Zheng et al. (2019) acerca del aumento de la deflexión con el aumento de temperatura del pavimento, aunque sea la misma temperatura del pavimento, la deflexión del pavimento más grueso es relativamente pequeña. Pues esta afirmación no se cumple debido a que en el gráfico se observa que algunas deflexiones bajas están ubicadas en temperaturas altas y en cuanto a su espesor de pavimento, en el corredor mostrado (el número 13) el espesor de la carpeta asfáltica es constante de 13.4 centímetros, aunque si hay variación de espesores de la capa de base granular y subrasante, entonces igualmente la declaración con respecto a el espesor del pavimento estaría errónea tomando en cuenta que la deflexión del primer sensor es influenciada en su mayoría por la varianza de espesor de la carpeta asfáltica que nuevamente, en este caso es constante y

debería de no influir en la relación de deflexión y temperatura superficial. Sin embargo, a pesar de todo lo comentado, si hay más concentración de puntos en la relación de baja deflexión y baja temperatura.

En el anexo 4 se encuentran los gráficos de la relación deflexión vs temperatura superficial de los 15 corredores.

5.7 Análisis del comportamiento de temperatura en el pavimento

Para la investigación, fue muy importante el análisis del comportamiento de temperatura en el pavimento flexible, pues sus respuestas estructurales y los módulos encontrados se ven totalmente influenciados bajo este fenómeno de temperatura. Por tal motivo, entender los gradientes de temperatura y el por qué durante las pruebas el sensor de temperatura entre un punto y otro punto podía registrar fluctuaciones de temperatura tan grandes era importante.

En la revisión del estado del arte se percibió como muchos autores usaban un software de predicción del perfil de temperatura del pavimento para analizar el gradiente de temperatura de manera no destructiva en vez de usar termopares los cuales requieren de una perforación en el pavimento para su instalación. Los autores, mediante la predicción de temperatura observaban cual era la temperatura efectiva a la mitad de la carpeta asfáltica en cada punto de prueba para que fuera registrada como la temperatura de la carpeta asfáltica en lugar de la temperatura superficial, la cual se comprobó está influenciada bajo muchos factores como sombras, cambios de la radiación solar, entre otras.

Esta variación de la temperatura superficial del pavimento en la medición de un punto y otro puede deberse a algún fenómeno externo como árboles en la carretera u otros elementos que generen sombra, no propiamente del material que lo compone. En la tabla 9 se muestra un ejemplo de los resultados del tramo Morelia – Guadalajara, uno de los tramos provenientes de la base de datos, donde se puede ver como los espesores de las capas son iguales y no hay mayor variación de las condiciones en 200 metros, pero si hay bastante cambio en uno de los valores de temperatura de la superficie. En el kilómetro 141+598 está la particularidad de la temperatura superficial debido a que se registró de 34.7°C y en el punto de prueba anterior es de 45.7°C, así como también el posterior, en el kilómetro 141+800, la temperatura

superficial es de 43.1°C. Las temperaturas subsecuentes siguen este rango de 42°C a 46°C. Este fenómeno se muestra en la tabla 9

Tabla 9. Coeficientes de relación de temperatura superficial vs deflexión máxima

Cadenamiento	Tipo de superficie	Deflexión	Coordenadas geográficas		Espesor de capas (cm)			Temperatura [°C]
		S1 (mm)	Latitud	Longitud	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Superficie
141+363	Flexible	0.441	19.96312	-102.25948	23.7	22.7	25.6	45.6
141+398	Flexible	0.469	19.96312	-102.25981	23.7	22.7	25.6	45.7
141+598	Flexible	0.463	19.96407	-102.26127	23.7	22.7	25.6	34.7
141+800	Flexible	0.433	19.96552	-102.26242	23.7	22.7	25.6	43.1
141+999	Flexible	0.254	19.96696	-102.26356	23.7	22.7	25.6	43.0
142+201	Flexible	0.549	19.96840	-102.26472	23.7	22.7	25.6	43.2
142+400	Flexible	0.844	19.96982	-102.26585	23.7	22.7	25.6	42.0
142+597	Flexible	0.739	19.97123	-102.26699	23.7	22.7	25.6	43.5

Para realizar la predicción de temperatura del pavimento y ver su influencia en las capas, se identificó un modelo de predicción de temperatura que fue incluido en el estado del arte. Este software Temps permite obtener el historial de temperatura del pavimento de un año que se tenga registro de información climática, además de representar el modelo de transferencia de calor en los pavimentos asfálticos bajo el siguiente principio. Ver imagen 35.

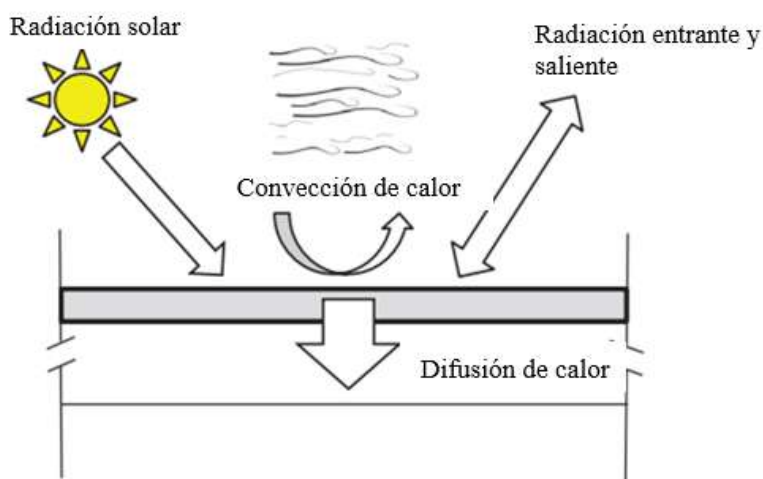


Imagen 35. Modelo de transferencia de calor del pavimento y su ambiente que lo rodea. Fuente: (Alavi, Pouranian, & Hajj, 2014)

Este software se escogió debido a su facilidad de instalación y aplicación puesto que consta de 5 fases sencillas e importantes para obtener el perfil de temperatura del pavimento de determinado tiempo de estudio. Las fases son:

1. Propiedades de los materiales

En este paso se inserta el tipo de material (carpeta asfáltica, base hidráulica, subrasante) el color con el cual se identificará la capa, la capacidad calorífica específica del material (sugerida por el software), la densidad y la conductividad. Los valores propuestos fueron los mostrados en la tabla 10:

Tabla 10. Valores de propiedades de los materiales de cada capa

TIPO DE MATERIAL	CAPACIDAD CALORÍFICA (J/kg°K)	CONDUCTIVIDAD (W/m°K)	DENSIDAD (kg/m³)
Carpeta asfáltica	921	1.21	2250
Base hidráulica	1900	1.00	1800
Subrasante	1900	1.00	1500

2. Información climática

Se descarga la información geográfica de diferentes puntos de la base de datos de radiación solar nacional (NSRDB) en donde se descargan los datos de temperatura del aire, velocidad del aire y radiación solar a partir de un archivo con extensión .csv. La información que se descarga corresponde de un punto dado con sus latitudes y longitudes extraídas del resumen de la base de datos

3. Características de la superficie

Se introducen las propiedades de radiación superficial y luego se ingresan los valores sugeridos por el programa correspondientes al albedo mensual requerido de 0.18, la emisividad de 0.85 y el coeficiente de absorción de 0.73.

4. Estructura del pavimento

Se inserta el espesor de cada capa del pavimento seleccionando su respectivo tipo de capa

5. Generación de la malla

Se genera una malla con determinado espaciamiento de toda la profundidad de las capas, posteriormente se corre el programa para obtener resultados.

Los resultados obtenidos con este programa son un perfil de temperatura del pavimento a lo largo del año de selección de los datos obtenidos de deflectometría y temperatura, que para el estudio fueron los del año 2020, a profundidades con intervalos de 0.01 metros hasta la profundidad total. Así mismo, se puede graficar el perfil de cada profundidad (z).

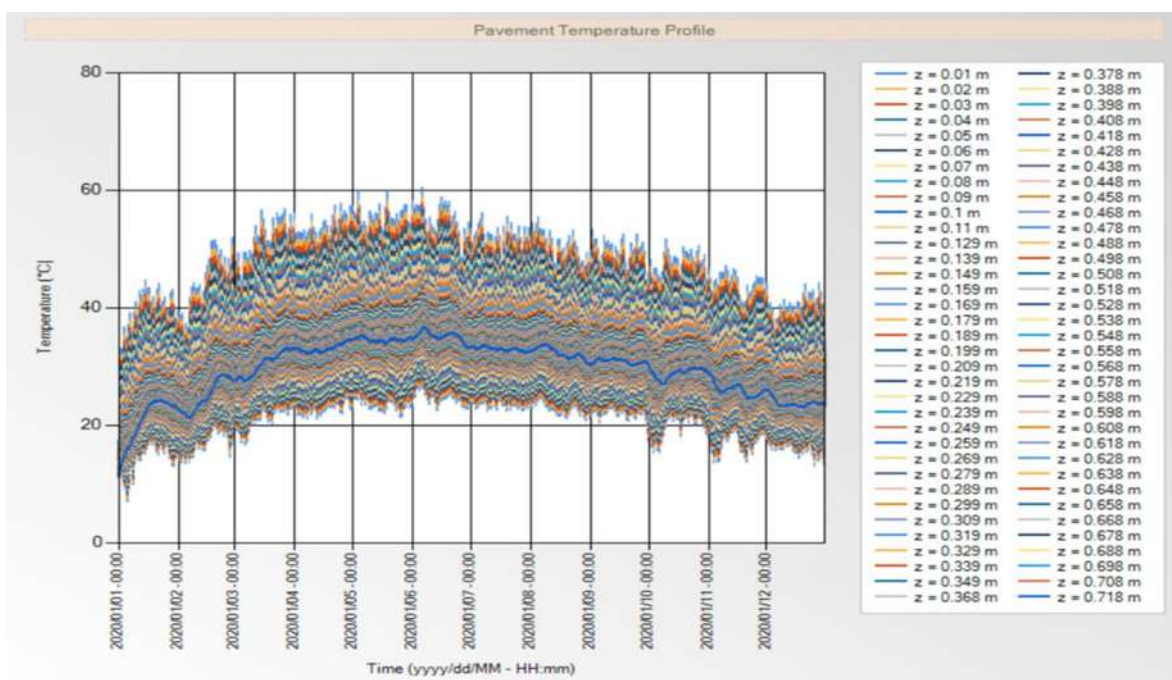


Imagen 36. Gráfico de resultado del perfil de temperatura del pavimento desde Z=0.01 a Z=0.718

Este perfil mostrado en la imagen 36 viene acompañado de un archivo editable con formato .csv del que se puede obtener las temperaturas de todos los días del año de un punto de deflexión seleccionado, con un intervalo de 30 minutos. Este archivo de resultados se muestra en el anexo 5. Con el uso de este archivo se realizaron todos los análisis correspondientes.

Primero se observó cual era el comportamiento de la temperatura en la superficie durante un día con respecto a los 12 meses. Su comportamiento es parecido a una campana de Gauss en el que se puede destacar que después de la hora de mayor radiación solar entre las 14 horas y las 15 horas es donde hay un incremento de temperatura. De la misma manera, se podía destacar el mes más frío y el mes más cálido. Pues en los 15 tramos de estudio coincidió que el mes más frío correspondía al mes de enero y el mes más cálido en el los corredores 1, 2, 3, 6, 7 y 11 correspondían a el mes de junio y en los de más corredores variaba entre mayo y julio. Ver imagen 37.

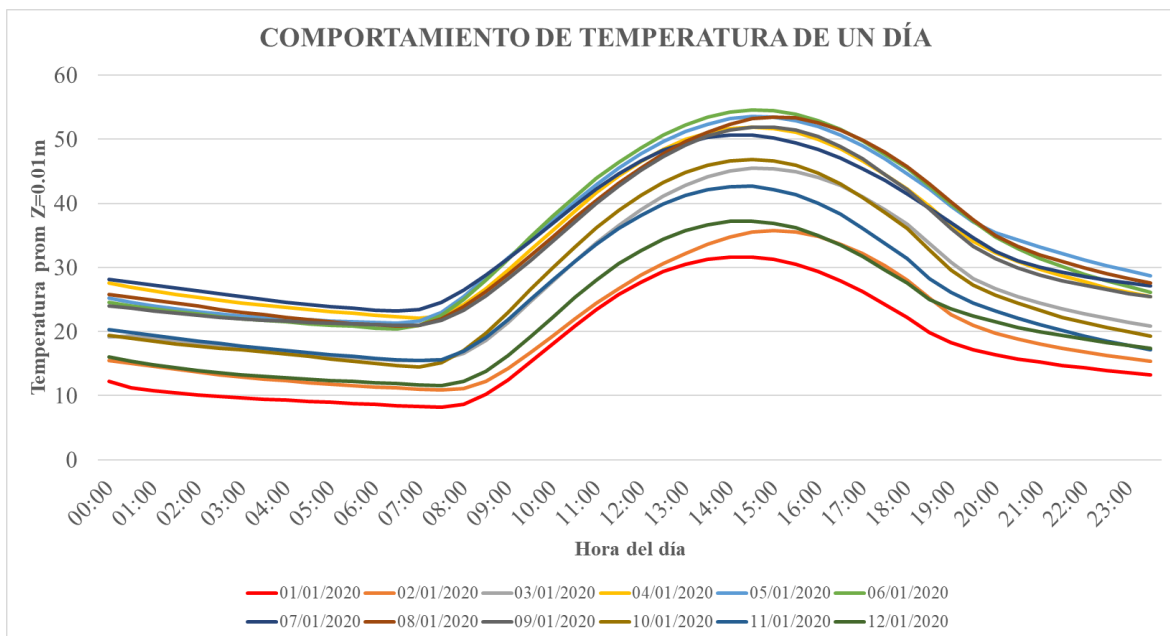


Imagen 37. Gráfico de comportamiento de temperatura de un día con el uso del programa TEMPS

5.8 Análisis de temperatura de predicción vs deflexión máxima

De dos de los tramos seleccionados correspondientes al corredor 1 y corredor 2, se evaluó el comportamiento de la temperatura superficial mediante la predicción. Para ello se llevó a cabo el procedimiento mostrado anteriormente con el software TEMPS para cada punto de prueba; se extrajo la temperatura a profundidad $z = 0.01$ metros, es decir a nivel superficial y se registró por punto. Un inconveniente importante era no conocer en qué fecha exactamente fueron realizadas las pruebas ni a qué hora se inició la medición. Aun así, se consideró el mes de medición y la hora para poder ver la diferencia de comportamiento frente a la temperatura superficial tomada durante la ejecución de las pruebas.

Después de este procedimiento, la temperatura de predicción de cada punto de prueba se mostraba más estable que la temperatura superficial tomada en campo, pues la variación de la predicción ocurría cada 30 minutos o en 10 puntos de prueba, considerando que las mediciones se realizaban con una frecuencia de 3 minutos por punto de prueba.

Con el fin de observar si la relación de temperatura superficial y deflexión mejoraba usando una temperatura se hizo un gráfico para correlacionar estas dos variables. Como resultado en ninguno de los tramos hubo buena correlación de deflexión y temperatura de predicción a nivel de la superficie, pues la dispersión es bastante grande en ambos tramos. En el tramo del

corredor 1 (Morelia – Guadalajara) el índice de correlación de estas variables fue de 0.046, en el tramo del corredor 2 (Querétaro – San Luis Potosí) es de 0.196 mostrado en la imagen 38.

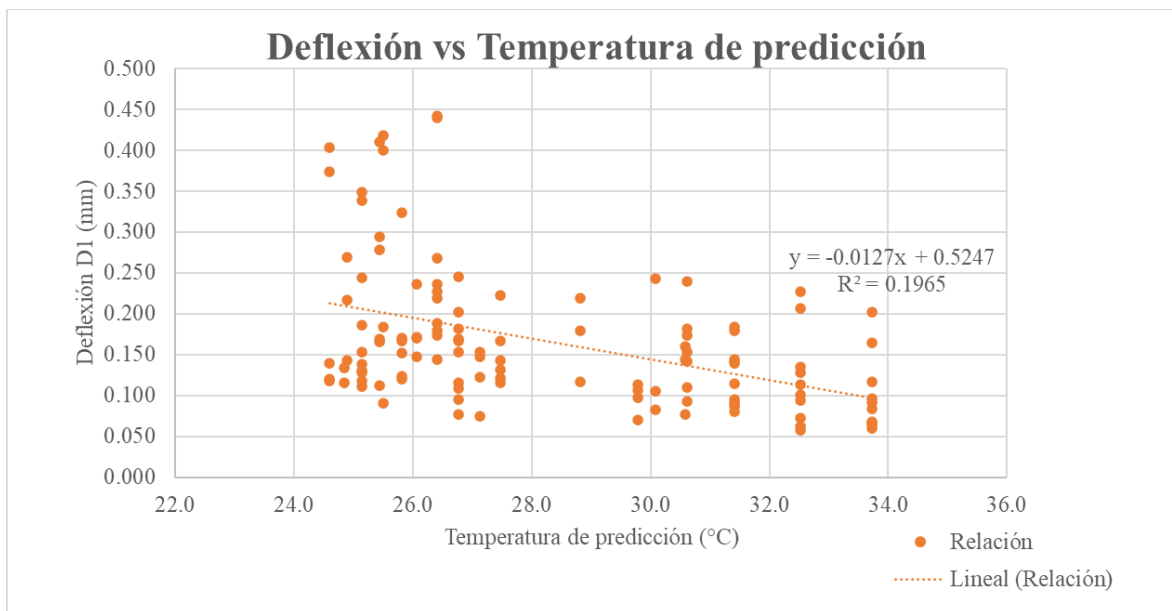


Imagen 38. Gráfico de relación deflexión vs temperatura de predicción del corredor 2

Aun así, asumir muchas variables de las pruebas como: fecha y hora de realización, tiempo de ensayo y obtener datos de temperatura de predicción de mínimo a cada 30 minutos, no poder establecer un rango más pequeño de datos hacía que los valores no fueran tan confiables pues en 1 kilómetro la temperatura del aire tiene variaciones considerables y en la temperatura de predicción no se muestra esta variación equivalente. Así mismo, la variación de temperaturas de predicción puede ocurrir de un día para otro y no tener noción exacta del día de pruebas afectaba totalmente los valores obtenidos de temperatura de predicción.

Por ello, la comparación de temperatura de predicción y deflexiones con este método no resulta efectiva. Aunado a todo lo mencionado anteriormente, el proceso para obtener la predicción de temperatura por punto de prueba resulta muy tardado y no es eficiente en tramos con longitudes grandes. Igualmente es importante recordar que el año de información meteorológica de la fuente de datos de la base de datos de radiación solar nacional por sus siglas en inglés NSRDB más actual es del 2021. En casos de estudio recientes es imposible obtener información.

5.9 Comparativo de ecuaciones con temperatura de predicción

De los dos tramos anteriores que se obtuvo la temperatura predicha, se realizó la normalización por medio de las fórmulas extraídas de los distintos autores donde se analizó su comportamiento y los efectos de la normalización con la temperatura de predicción. Además, se comparó este comportamiento frente a las deflexiones donde se normalizó la temperatura superficial con el uso de las distintas fórmulas de la literatura mostrada en el apartado de “comparativo de ecuaciones con temperatura superficial”.

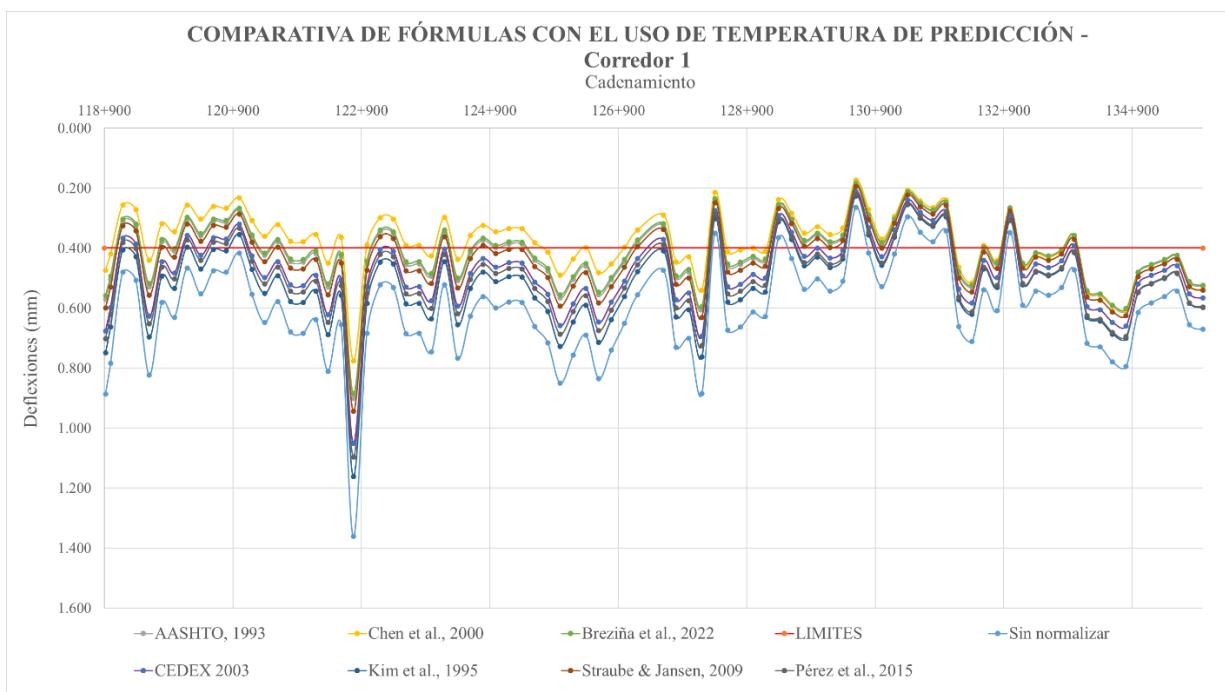


Imagen 39. Comparativo de ecuaciones con temperatura de predicción del corredor 1

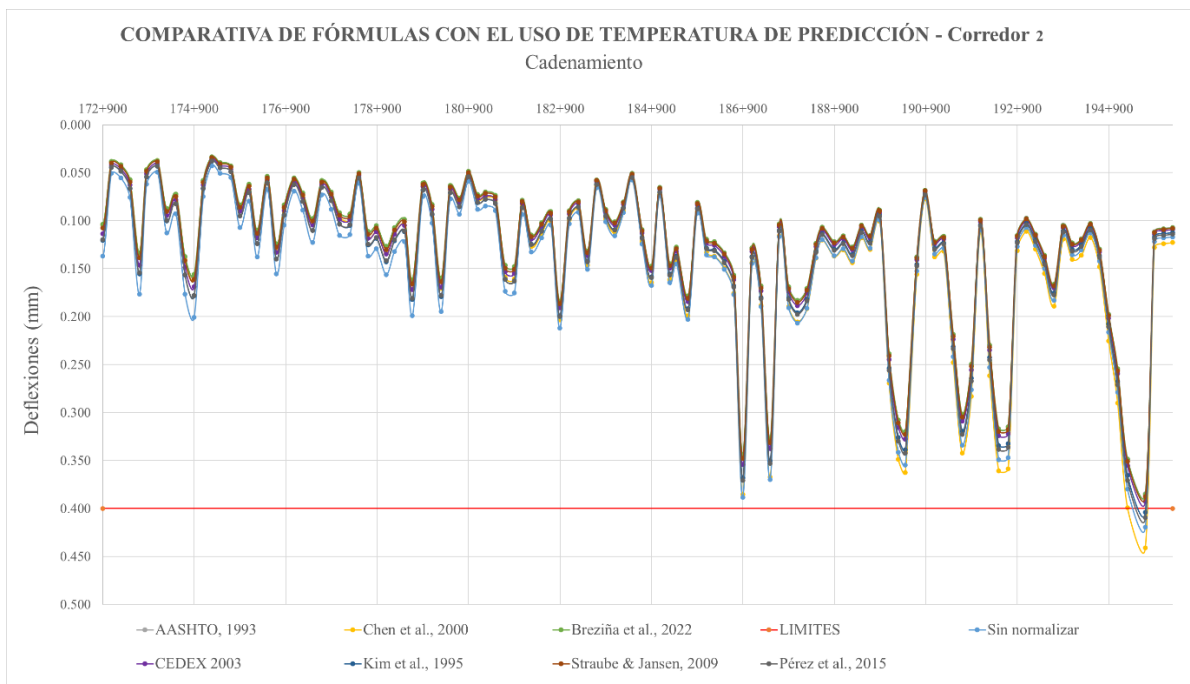


Imagen 40. Comparativo de ecuaciones con temperatura de predicción del corredor 2

En las imágenes 39 y 40 se puede ver qué el comportamiento de la normalización es bastante parecido al análisis realizado anteriormente de las fórmulas de la literatura, pues en el gráfico del corredor 1 se sigue destacando que la fórmula del autor Chen es el que mayor corrección realiza y la que menor normaliza es la del autor Kim. Ahora, en el gráfico de la normalización con temperatura de predicción del corredor 2 todas las fórmulas normalizan a un comportamiento muy similar pues en este tramo la particularidad está en que las temperaturas de predicción son muy cercanas a 20° C por lo cual la normalización de la temperatura es mínima. Por lo mismo de esta cercanía a la temperatura de referencia, sobre todo a partir del cadenamiento 184+290 al final del tramo, la fórmula de Chen ahora es la que menor normalización realiza.

En el anexo 6 se encuentra la tabla de resultados del corredor 1 ejemplificado con el gráfico de la imagen 39.

Resultado de lo anterior, continua la necesidad de representar de mejor manera este comportamiento tan diverso de las deflexiones en función de la temperatura que es de donde partirá la ecuación de ajuste propuesta.

5.10 Comportamiento de temperatura en el pavimento flexible

Posterior al análisis, se determinó que emplear solamente el método de predicción de temperatura como remplazo a la temperatura de prueba no fue eficiente. Sin embargo, usar el software TEMPS para conocer el gradiente térmico en las capas era bastante útil debido a que el perfilado de temperatura en las capas que componen el pavimento asfáltico con una precisión bastante buena de 0.01 metros, permitía conocer el comportamiento de la temperatura a lo largo de la profundidad del pavimento mediante un análisis no destructivo contrario a el análisis que se puede obtener con el uso de termopares.

Del tramo del corredor 1 (Morelia – Guadalajara) se hizo el análisis del gradiente térmico con el software TEMPS en el que se introdujeron todos los datos de la característica de los materiales, espesores de las capas que componen el pavimento y la información climática de uno de los puntos geográficos de las deflexiones de este tramo.

Una vez se tienen los resultados del programa con las temperaturas en un intervalo de 30 minutos de todos los días del año a profundidades de 0.01 metros de intervalo hasta la profundidad total. Que en este caso de estudio la profundidad del pavimento es de 0.72 metros. Donde se tomó en conjunto el espesor de la carpeta asfáltica de 11.9 cm, la base hidráulica de 23.9 cm y la subrasante de 36.3 cm.

Se hizo un gráfico con la información de temperaturas de dos días consecutivos con profundidades de 0.01 m correspondiente a nivel superficial, 0.06 m que era la profundidad a la mitad de la carpeta asfáltica, final de la carpeta asfáltica 0.11 m, 0.24 m correspondientes a la mitad de la base hidráulica, 0.35 m que es el final de la base hidráulica, la profundidad media de la subrasante a 0.54 m y finalmente, el espesor total del pavimento a 0.72 m. Este gráfico se muestra a continuación en la imagen 41:

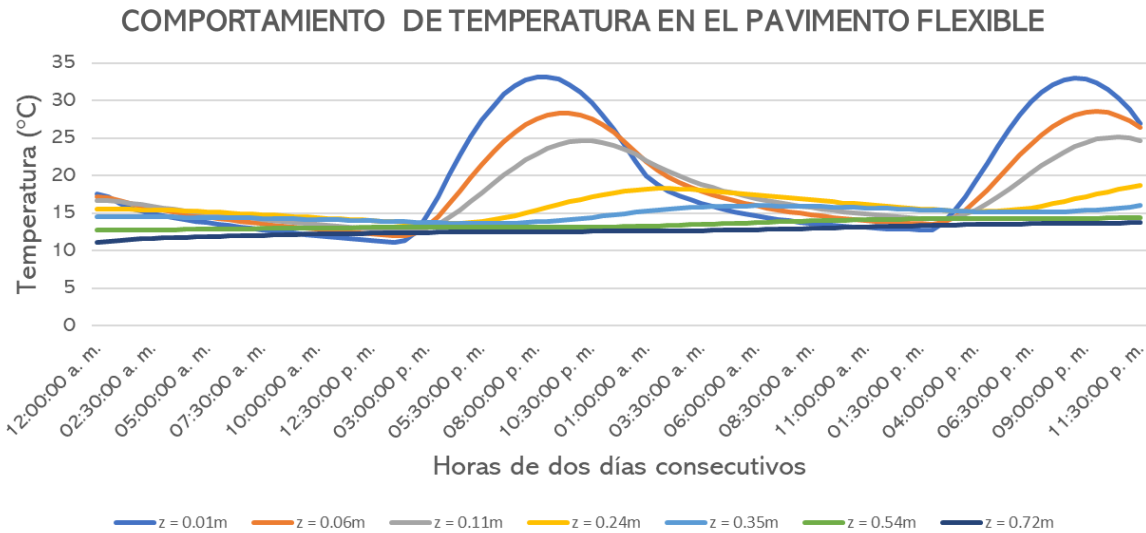


Imagen 41. Gráfico de comportamiento de temperatura en el pavimento flexible del tramo del corredor 1

Aquí se puede observar la influencia de la temperatura en la capa asfáltica y la escasa influencia en la primera capa de base hidráulica. Los materiales de la base hidráulica y subrasante son materiales granulares por lo cual la temperatura no es un factor determinante en su comportamiento contrario a la carpeta que está compuesta por un material en el que su comportamiento viscoelástico depende de este factor dominante de la temperatura. También, el gradiente de temperatura en las capas del pavimento no es uniforme, pues se disipa la temperatura a medida que incrementa la profundidad. Llegando al punto final donde la influencia de la temperatura a partir de la profundidad media de la capa de subrasante es casi nula.

Posteriormente se realizó un gráfico (ver imagen 42) detallado de la influencia de la temperatura en la carpeta asfáltica a nivel superficial y al medio de la carpeta, esta última temperatura la llamada temperatura efectiva. En el gráfico se puede ver que la temperatura efectiva marcada en rojo es más uniforme puesto que esta temperatura no tiene fluctuaciones tan significativas presentadas en la capa superficial como lo son las sombras, cambios fuertes de temperatura y demás factores que inciden directamente en la capa superficial.

Otro aspecto importante a destacar es la hora de mayor radiación solar. Según AMEVEC (2022) “México es uno de los países con mayor irradiación en el mundo”. En caso de México por su posición geográfica se puede observar en la imagen 42 que después de las 2 de la tarde

donde seguramente hay mayor radiación, hay un aumento bastante grande de la temperatura superficial del pavimento.

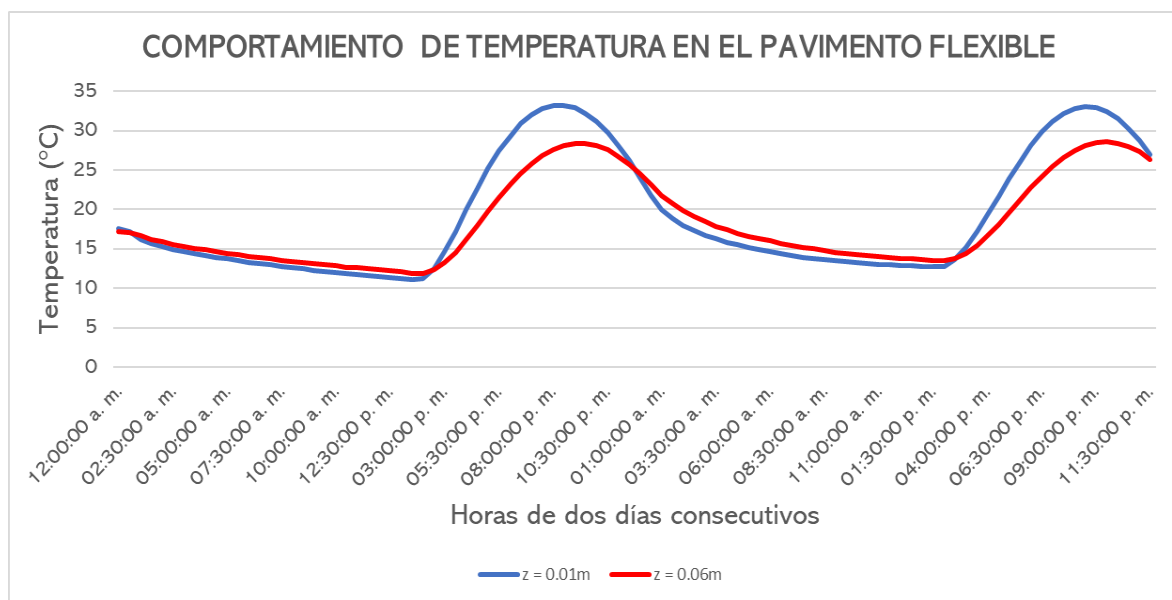


Imagen 42. Comportamiento de temperatura en el pavimento flexible a profundidad superficial y a profundidad media de la carpeta asfáltica

5.11 Comportamiento de las deflexiones en función de la temperatura

5.11.1 Pruebas de campo

Dado que se ha observado una alta dispersión en la relación de la deflexión tomada en campo y la temperatura superficial tomada por el equipo. Además de que se evidencia en el apartado de “Relación temperatura superficial versus deflexiones” que este comportamiento no tiene relación lineal. Por tal motivo, se continuó con la búsqueda de un comportamiento que mejor se adapte y represente la variabilidad que tienen las deflexiones con las diferentes temperaturas superficiales del pavimento.

La información contenida en la base de datos proporcionada por la Dirección General de Servicios Técnicos tenía una gran cantidad de variables desconocidas por lo que se reconocía la importancia de realizar unas pruebas de campo que permitieran tener un mejor control de los factores de influencia en las pruebas de deflexión y monitorear el ambiente de realización de las pruebas con el conocimiento de la hora exacta en la que se realizó la prueba, sombras en los puntos y la temperatura superficial calibrada.

La metodología para estas pruebas de deflectometría efectuadas en un tramo del estado de Michoacán, tienen como objetivo el análisis de las deflexiones de un pavimento asfáltico ante las variaciones diarias de la temperatura mediante el monitoreo continuo de la temperatura de la carpeta asfáltica y sus gradientes térmicos. Esta se compone por cinco fases importantes descritas a continuación: Ver imagen 43.

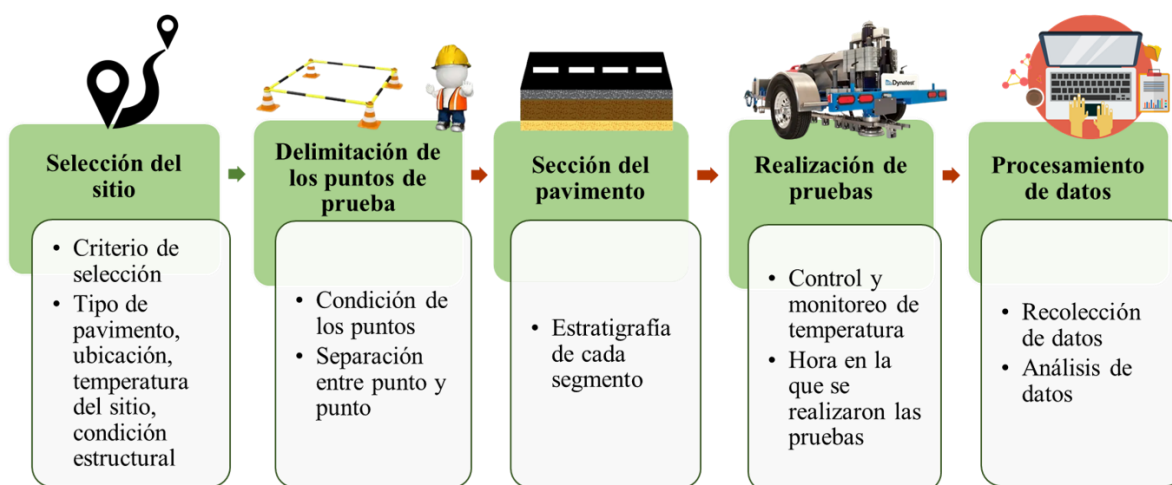


Imagen 43. Metodología para pruebas de campo de deflectometría

5.11.1.1 Selección del sitio

Se llevó a cabo una evaluación cualitativa de los posibles tramos donde se podrían llevar a cabo las pruebas de las deflexiones. Principalmente se realizó una búsqueda previa en gabinete con la ayuda de herramientas digitales, con el objetivo de asegurar que las ubicaciones propuestas cumplieran con los requisitos necesarios para llevar a cabo la investigación de una manera efectiva. Para ello se tomaron en cuenta algunos criterios, estos criterios consistían en: que fuera un pavimento asfáltico y no tuviera ningún tratamiento superficial, que fuera una estructura con un aporte estructural importante, con estratigrafía fácil de obtener y en respecto a factores ambientales del tramo, que no fuera una zona lluviosa y donde se tuviera conocimiento de la temperatura ambiente.

Una vez identificados los tramos, se realizó una visita física a los sitios, donde además de supervisar las condiciones del pavimento, se revisaron también condiciones climáticas de acuerdo con lo mencionado anteriormente. A continuación, se fueron descartando aquellos que no cumplieran con las condiciones necesarias, hasta elegir el tramo más favorable.

El tramo carretero de estudio está ubicado al noroeste de Morelia identificado como la Antigua Carretera a Morelia – Pátzcuaro, correspondiente a la carretera estatal No. 171 en el estado de Michoacán, en el municipio de Uruapilla. El tramo seleccionado se encuentra en el kilómetro 5+567.12, tiene una longitud de 200 metros, un ancho de corona de 6.5 metros, con un carril por sentido. La siguiente figura (imagen 44) muestra la ubicación de la zona de estudio.

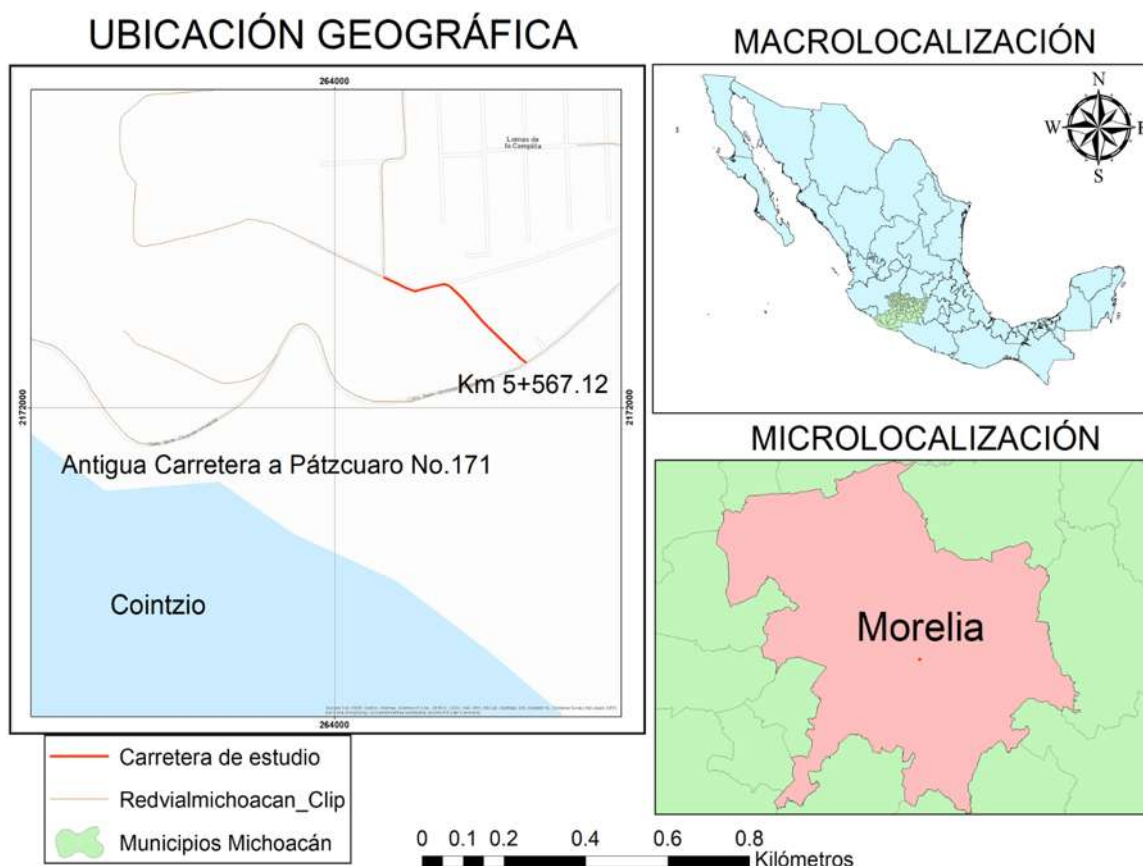


Imagen 44. Mapa de localización del sitio de prueba

5.11.1.2 Delimitación de los puntos de prueba

Con la finalidad de mantener un ambiente controlado en la zona donde se lleva a cabo las pruebas, se definieron los puntos delimitándolos en un cuadrado de un metro por un metro y enumerándolos, para que cada uno tenga una identificación apropiada. De esta manera, garantiza que el ensayo siempre se hiciera en el mismo punto, tal como se muestra en la imagen 45 donde se observa que el plato de carga del FWD se está apoyando dentro del punto delimitado.



Imagen 45. Plato de carga del deflectómetro FWD apoyándose en el punto delimitado

Se eligieron 4 puntos de prueba, los cuales fueron localizados de manera estratégica en el tramo en cuestión. El espaciamiento entre cada punto fue de 20 metros, pues esta separación fue elegida de tal manera que el deflectómetro no influyera generando sombra entre un punto y otro punto, así mismo se eligió un sitio donde no hubiera problemas de sombras por algún elemento y tener el suficiente espacio para efectuar las pruebas. Los puntos, se enumeraron de manera consecutiva iniciando en el número 1 y terminado en el número 4.

5.11.1.3 Sección del pavimento

Previo a la realización de las pruebas se obtuvieron los espesores de la estructura del pavimento a evaluar por medio de pozos a cielo abierto, la imagen 46 muestra la sección del pavimento compuesta por 0.05 metros de carpeta asfáltica, 0.30 metros de base hidráulica y

un espesor desconocido de terreno natural. Además, conocer la estructura del pavimento de estudio permitía relacionar y comprobar las respuestas estructurales del pavimento asfáltico.

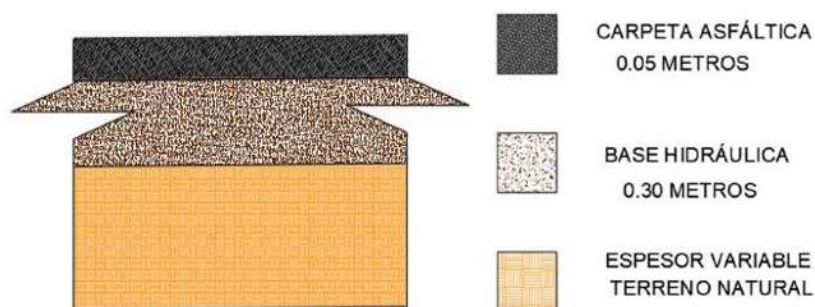


Imagen 46. Sección del pavimento

5.11.1.4 Realización de Pruebas

Las pruebas se realizaron con un deflectómetro de impacto (FWD) mostrado en la imagen 47, durante 3 días consecutivos. En cada punto eran aplicados 4 golpes que correspondían de la siguiente manera: el primero de asentamiento (50KN), el segundo y tercer golpe con una fuerza de 50 kN y el último golpe con una fuerza mayor a la anterior de 70 KN; así mismo, el deflectómetro mediante el aditamento de temperatura superficial ya calibrado, realizaba el registro de la temperatura en cada punto. En el primer día se realizaron 22 pruebas en cada uno de los cuatro puntos, teniendo como resultado 88 pruebas. Para el segundo día se realizaron 21 pruebas de cada punto y finalmente, para el ultimo día se realizaron 20 pruebas por punto. Como resultado final se realizaron 252 pruebas en total. Las pruebas eran ejecutadas desde las 6:30 de la mañana hasta las 21:00 horas, estas, teniendo un intervalo de media hora o a cada hora dependiendo del comportamiento de la temperatura superficial observado.



Imagen 47. Deflectómetro de impacto en zona de prueba

5.11.2 Análisis de resultados de las pruebas de campo

Una vez terminadas las pruebas se extrajeron los datos de la computadora asignados en un formato de Microsoft Access (.Mbd) los cuales fueron trasladados a una hoja de Excel para su análisis.

En este archivo se dividió la información por días de medición en cada hoja. De los 3 días se obtuvo la separación por el número de mediciones ejecutadas en cada uno de los días y por los 4 puntos de prueba. Como se comentó previamente se realizaron 4 golpes, pero el respectivo a asentamiento no considera valores del programa por lo cual son mostrados 3 valores de golpes para obtener la deflexión, siendo el último golpe, el de mayor fuerza.

Se extrajeron los valores de deflexión de los 7 sensores del equipo, así como la temperatura de la superficie, la temperatura del aire y la hora exacta de ejecución de cada golpe. A continuación, se muestra el orden de los datos de cada medición en la tabla 11:

Tabla 11. Separación de datos por número de punto

	Punto	Cadenamiento	Estación	DropID	Stress	Force	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	Superficie	Aire	Hora
M E D I C I Ó N 1	1	0	1	1	706.00	49.89	474.80	210.60	85.60	41.50	18.90	11.50	7.50	11.6	11.5	06:38
			1	2	705.00	49.82	462.80	203.70	85.20	44.30	18.60	11.40	7.30	11.6	11.5	06:38
			1	3	1070.00	75.63	565.80	233.90	117.00	115.10	28.30	18.20	11.80	11.6	11.5	06:38
	2	21.8	2	1	668.00	47.24	613.70	274.30	149.60	87.60	36.60	24.60	18.40	12.9	11.2	06:42
			2	2	666.00	47.04	605.00	274.60	151.00	87.50	37.40	24.50	17.60	12.9	11.2	06:42
			2	3	1040.00	73.48	815.70	431.90	240.00	146.30	57.80	37.10	28.00	12.9	11.2	06:42
	3	41.9	3	1	630.00	44.55	805.40	419.50	267.70	171.30	75.70	39.80	23.70	12.3	11.1	06:47
			3	2	631.00	44.59	777.40	417.60	269.00	173.60	77.40	40.20	24.50	12.3	11.1	06:47
			3	3	995.00	70.30	1135.20	665.70	439.20	276.40	121.50	62.90	38.20	12.3	11.1	06:47
	4	62.2	4	1	624.00	44.09	797.30	406.80	238.40	143.20	60.70	36.00	26.20	12.7	11.1	06:49
			4	2	624.00	44.07	782.80	405.40	240.80	144.20	60.10	36.00	25.50	12.7	11.1	06:49
			4	3	987.00	69.75	1189.90	635.20	398.70	236.20	96.50	56.60	41.40	12.7	11.1	06:49

Posteriormente, se dividieron los datos de cada día por número de punto para hacer el análisis correspondiente de cada uno: Ver tabla 12.

Tabla 12. Separación de datos por número de medición

	Punto	Cadenamiento	StationID	DropID	Stress	Force	D1	T. Superficie	T. Aire	Hora
MEDICIÓN 1	1	0	1	1	706.00	49.89	474.80	11.6	11.5	06:38
			1	2	705.00	49.82	462.80	11.6	11.5	06:38
			1	3	1070.00	75.63	565.80	11.6	11.5	06:38
MEDICIÓN 2	1	0.1	6	16	639.00	45.17	642.10	11.6	10.9	06:59
			6	17	637.00	45.01	579.20	11.6	10.9	06:59
			6	18	1032.00	72.97	534.70	11.6	10.9	06:59
MEDICIÓN 3	1	-0.4	10	28	633.00	44.71	603.40	11.9	10.7	07:28
			10	29	626.00	44.21	587.40	11.9	10.7	07:28
			10	30	1020.00	72.06	678.30	11.9	10.7	07:28

Se comenzó realizando un gráfico propio de la respuesta estructural de la carpeta asfáltica relacionando la deflexión máxima en el primer golpe, después de asentamiento, sin ninguna normalización adicional por carga para no afectar esta naturaleza de los resultados y la temperatura superficial. Como resultado se obtiene un gráfico con una aproximación lineal a los valores dados. Ver imagen 48.

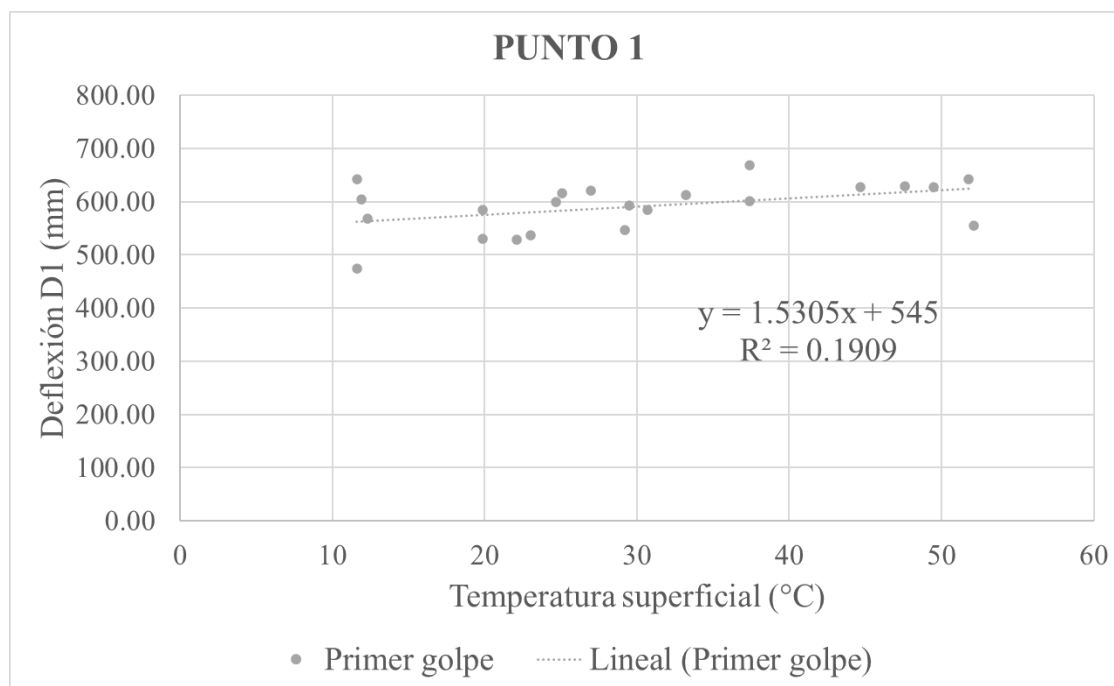


Imagen 48. Gráfico con aproximación lineal de la relación de deflexión máxima y temperatura superficial

Este procedimiento se realizó para los puntos 2, 3 y 4 del mismo día. De la misma manera, se realizó para los otros dos días de prueba en cada uno de los 4 puntos de los cuales se obtuvo los siguientes resultados de relación cuadrática entre estas dos variables. Ver tabla 13.

Tabla 13. Relación cuadrática de deflexión máxima y temperatura superficial de los 4 puntos durante los 3 días de prueba

DÍA	PUNTO	R ²
21	1	0.1909
	2	0.579
	3	0.6863
	4	0.6606
22	1	0.0024
	2	0.0028
	3	0.5775
	4	0.001
23	1	0.0118
	2	0.3872

3	0.6657
4	0.6814

En el anexo 7 se encuentran los resultados de las deflexiones máximas y temperatura superficial en cada punto de prueba de los 3 días.

Posterior al análisis de los ensayos realizados en un ambiente controlado y teniendo la noción de las variables existentes, se puede evidenciar que el ajuste lineal no es el que mejor se adapta al comportamiento de las deflexiones y la temperatura. Contrario a lo mostrado en la literatura, pues los autores García & Castro (2011) y Chen et al. (2000) en sus investigaciones han obtenido buenos resultados en la relación de estas dos variables. Por una parte, García y Castro en su estudio experimental que constaba de siete pruebas de deflexión en el mismo día obtuvo una relación lineal entre deflexión del primer sensor y temperatura con un coeficiente de correlación de 0.990. Por otra parte, Chen et al. (2000) en sus tres tramos de prueba durante 1 día, realizaron pruebas de deflexión a diferentes temperaturas en intervalos de 15 y 30 minutos y buscaron una relación de la deflexión del sensor 1 y la temperatura media del pavimento, en la cual obtuvieron como resultado que en el tramo 1 hubo una correlación de 0.9079, en el tramo 2 de 0.9892 y en el tramo 3 de 0.9602.

Para comprobar que esta relación sería igual en los otros dos golpes, incluso en el último aplicado con mayor fuerza, se graficó la deflexión y la presión como se muestra en la imagen 49. Llegando a demostrar que el comportamiento de deflexiones es muy similar, pues su variación está en que las deflexiones del segundo golpe son un poco mayores. Este incremento se puede atribuir a diversos factores de la respuesta del material como lo es la fatiga después de haber sido sometido segundos antes a un golpe. Por este motivo, en la elección de la comparativa, se eligieron los resultados correspondientes al primer golpe. De igual forma, el último golpe, en el que se ejerció mayor presión, el comportamiento de las deflexiones, al igual que los resultados de los anteriores golpes, es bastante similar.

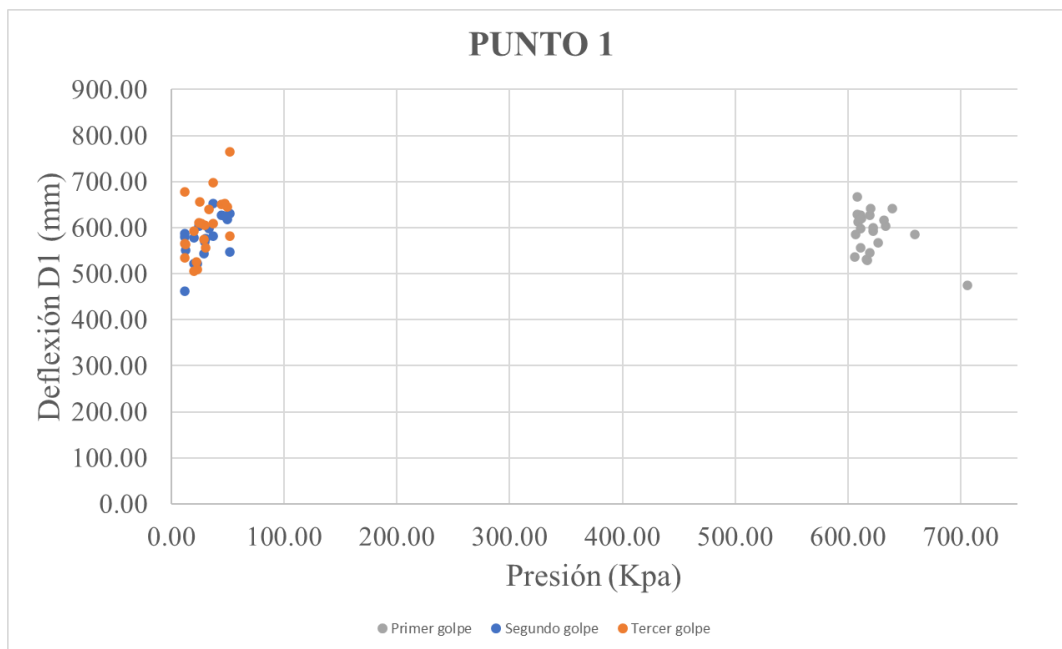


Imagen 49. Gráfico de relación deflexión máxima y presión

Con el fin de observar el comportamiento de temperatura a lo largo de un día se realizaron los gráficos 1, 2, 3 de la imagen 50, 51 y 52. Estos gráficos muestran el comportamiento de la temperatura superficial en los cuatro puntos de cada día de prueba de modo que se podía realizar un seguimiento de la hora en la que se registraba la temperatura máxima y mínima del pavimento.

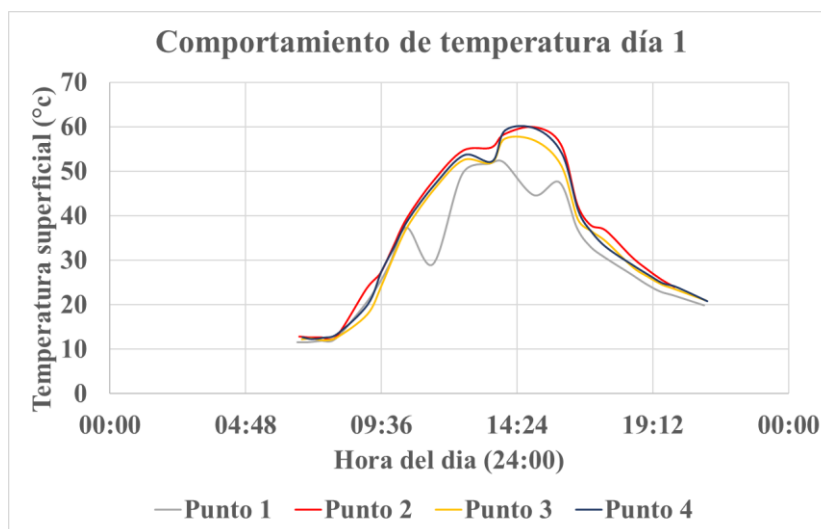


Imagen 50. Gráfico 1. Comportamiento de temperatura día 1

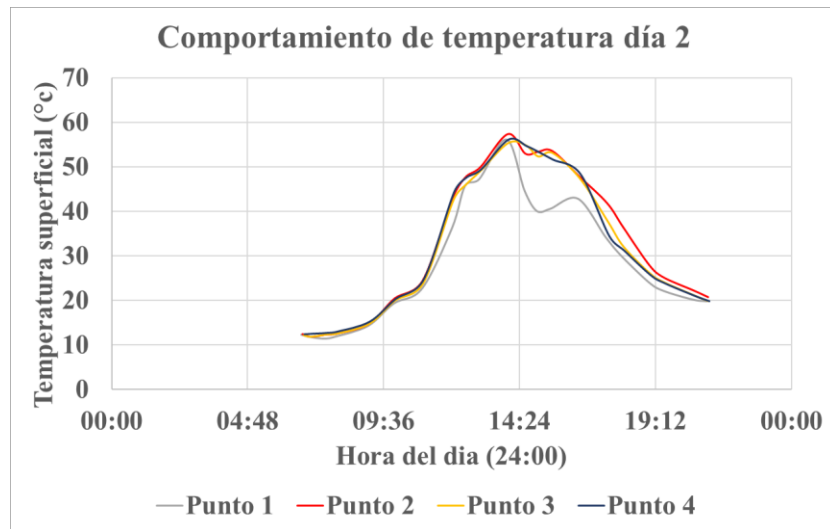


Imagen 51. Gráfico 2. Comportamiento de temperatura día 2

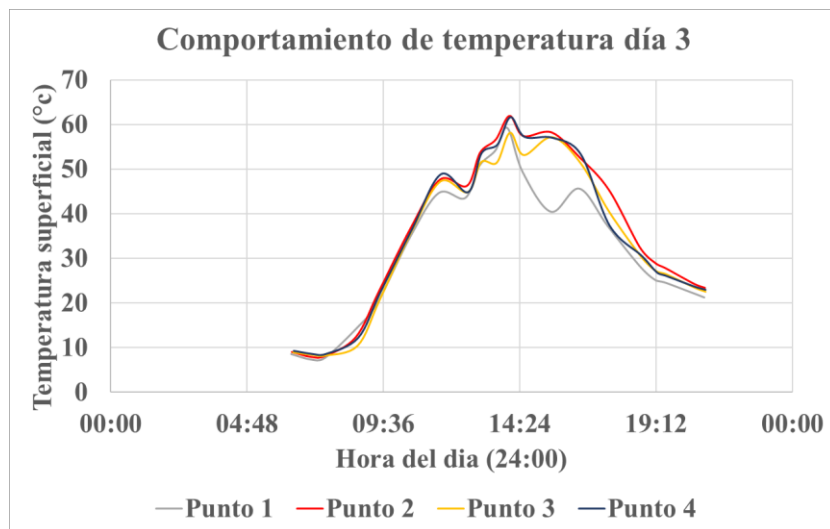


Imagen 52. Gráfico 3. Comportamiento de temperatura día 3

Esto es un ejemplo de la variabilidad de la temperatura superficial a lo largo del día, además de registrar sus incrementos y decrementos anormales debido a factores que pueden influir en este comportamiento uniforme como puede ser la sombra que ejercen las nubes al pasar por el sol donde se pueden destacar los bajos de los gráficos. De la misma manera, observar el punto más alto de temperatura, donde existe mayor radiación solar a lo largo del día la cual no necesariamente corresponde a la mitad del día. Se puede ver que aun en horas de la tarde hay incrementos de temperatura hasta aproximadamente las 1 o 2 de la tarde donde se registrar este pico de temperatura. Principalmente se destacan los ciclos de calentamiento en las horas de la mañana y de enfriamiento en las horas de la tarde y noche. Los autores Park

et al. (2001), Zheng et al. (2019), Shao et al. (1997) en sus investigaciones igualmente realizan un gráfico de este tipo para ver el comportamiento de la temperatura superficial a lo largo del día desde el argumento que un comportamiento ideal y sin influencias externas, tiene la forma de una campana de Gauss. Estos autores si asemejan bastante su comportamiento en campo a este tipo de gráfico, tal como se muestra a continuación en la imagen 53 correspondiente al gráfico de la variación de la temperatura en un periodo de 24 horas realizado por Park et al. (2001):

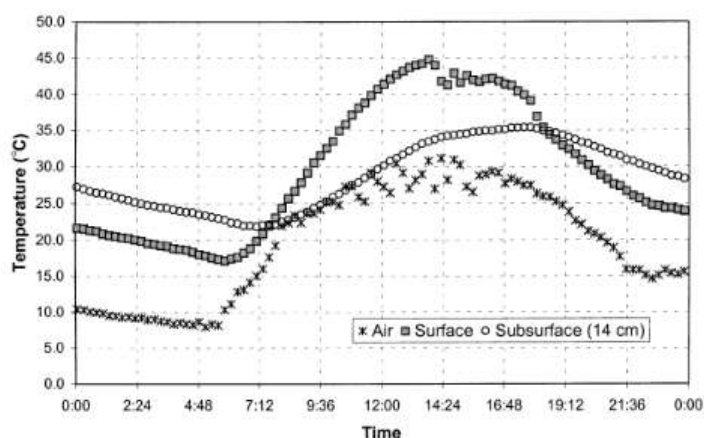


Imagen 53. Variación de la temperatura en un periodo de 24 h. Gráfico temperatura vs hora. Fuente: (Park et al., 2001)

Con el fin de encontrar una mejor relación lineal se seccionaron los datos de deflexiones de manera que estuvieran divididas en las deflexiones obtenidas antes de la hora pico de temperatura y las obtenidas después de la hora pico de temperatura por cada uno de los puntos. Esta hora pico es el punto más alto del gráfico, como el punto de inflexión en el cambio de pendiente. Por lo que se asumía que buscar un comportamiento lineal dado estos dos ciclos durante el día: de enfriamiento y calentamiento, era lo que podía influir en la dispersión de las deflexiones debido a que se tenían dos comportamientos diferentes: uno de incremento y otro de decremento.

Se realizaron los gráficos de cada punto y de cada día de la siguiente manera: ver imágenes 54 y 55.

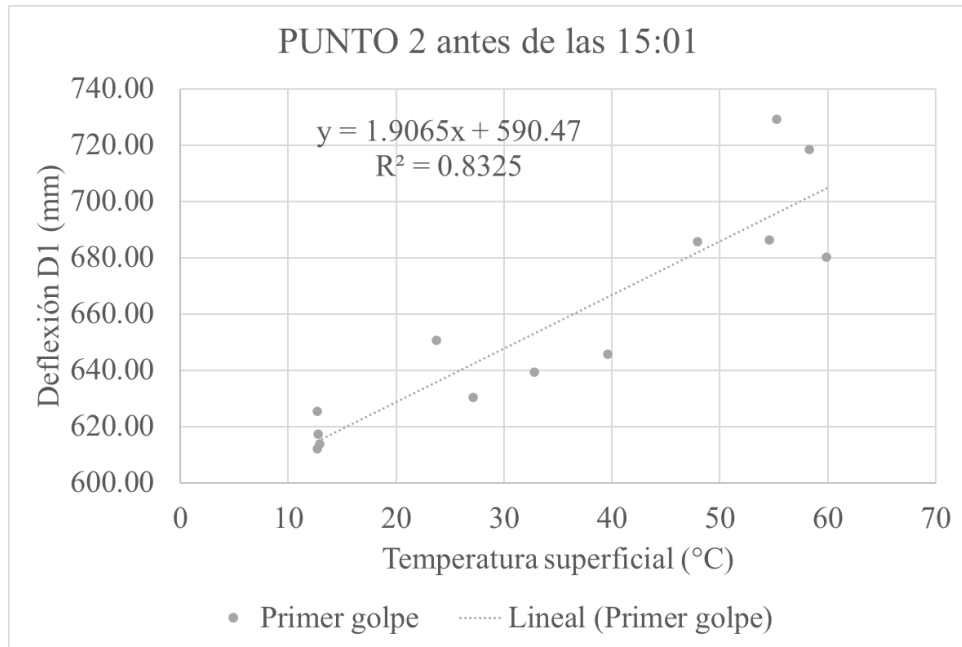


Imagen 54. Gráfico 1. Relación lineal del punto 2 antes de la hora pico de temperatura

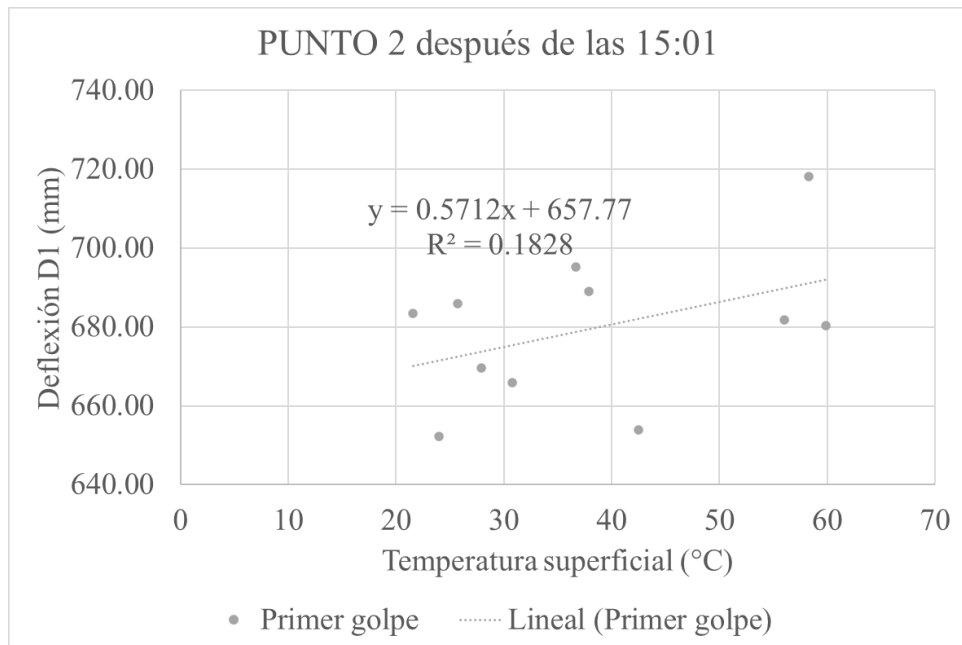


Imagen 55. Gráfico 2. Relación lineal del punto 2 después de la hora pico de temperatura

Como resultado se obtuvieron los siguientes valores de hora pico de temperatura y coeficiente de correlación mostrados en la tabla 14:

Tabla 14. Hora pico de temperatura y relación cuadrática de la relación deflexión y temperatura antes y después de la hora pico

Día	Punto	Hora pico de temperatura	Coeficiente de correlación R2	
			Antes	Después
1	1	13:56	0.0831	0.5867
	2	15:01	0.8325	0.2006
	3	15:03	0.7968	0.5807
	4	15:04	0.9357	0.6492
2	1	13:57	0.0893	0.4329
	2	13:59	0.0041	0.4377
	3	14:38	0.6991	0.4948
	4	14:01	0.0051	0.1395
3	1	13:57	0.0026	0.4212
	2	14:02	0.4666	0.6478
	3	14:03	0.7868	0.7635
	4	14:04	0.6785	0.7946

Se puede ver que en el punto 1, de los tres días de prueba, su pico de temperatura fue a una hora bastante parecida (13:57). Sin embargo, en los otros puntos, aunque se asimilaba mucho la hora pico de los tres puntos en el mismo día, su hora pico de cada uno de los tres días fue diferente. Así mismo, se observa que en algunos mejoraba su correlación de los datos antes de la hora pico de temperatura, en algunos otros después de la hora pico y en otros casos en ninguno de los dos la correlación de los datos de deflexión y temperatura era buena. Por lo que se considera que esta afectación de los ciclos de temperatura del día no se retribuye totalmente a la no linealidad de los datos, pues no hay mayor influencia en considerarlos por ciclos, aun así, su relación es baja.

De no haber una buena relación de las deflexiones máximas y la temperatura superficial se graficó en el software Wolfram Mathematica los resultados de deflexión máxima, temperatura superficial y presión sin normalizar, con el fin de observar el comportamiento que había de cada punto del primer día de prueba, de tal manera, que, de haber una relación, se pudiera observar dicho comportamiento. Ver imágenes 56, 57, 58 y 59.

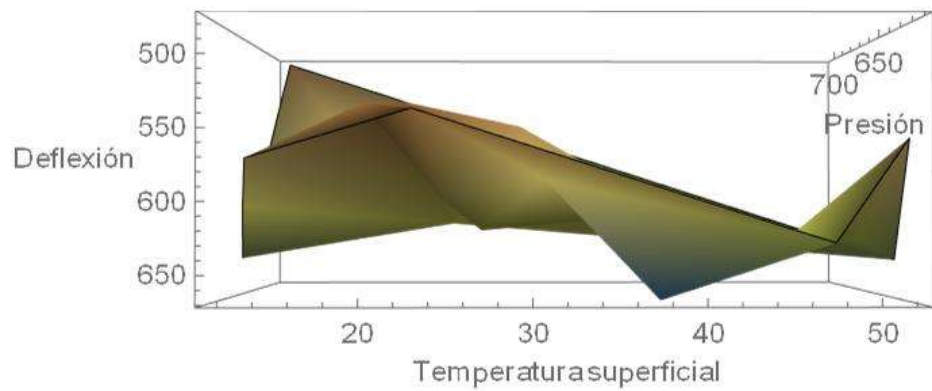


Imagen 56. 1. Gráfico 3D punto 1

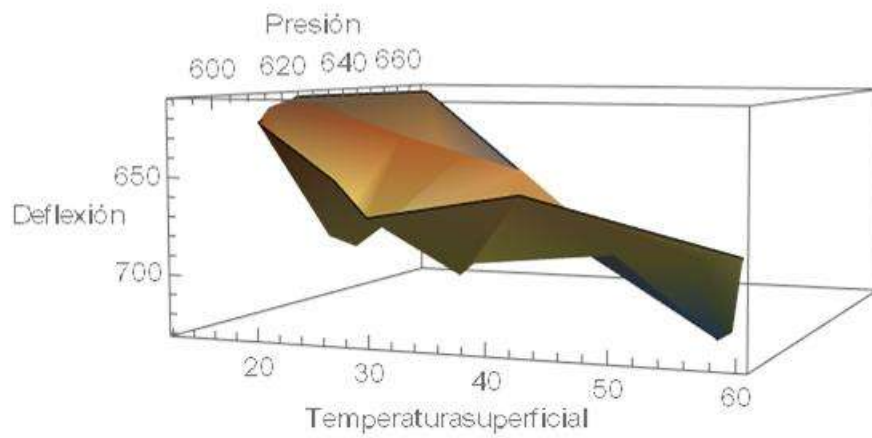


Imagen 57. 2. Gráfico 3D punto 2

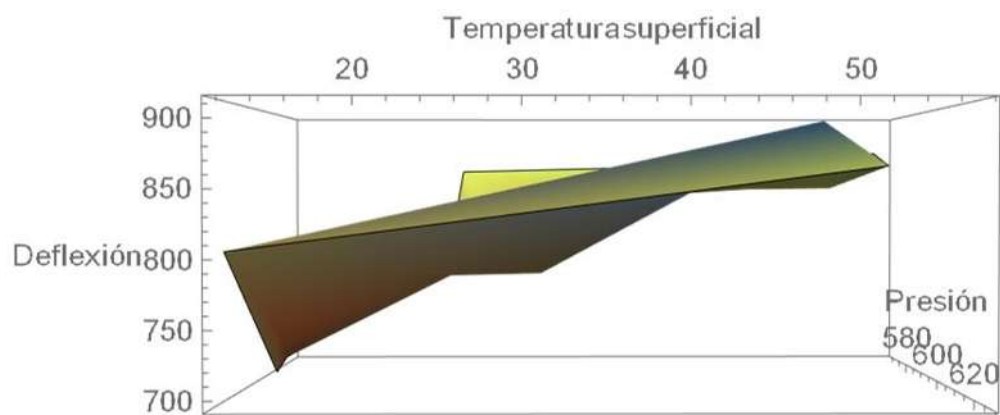


Imagen 58. 3. Gráfico 3D punto 3

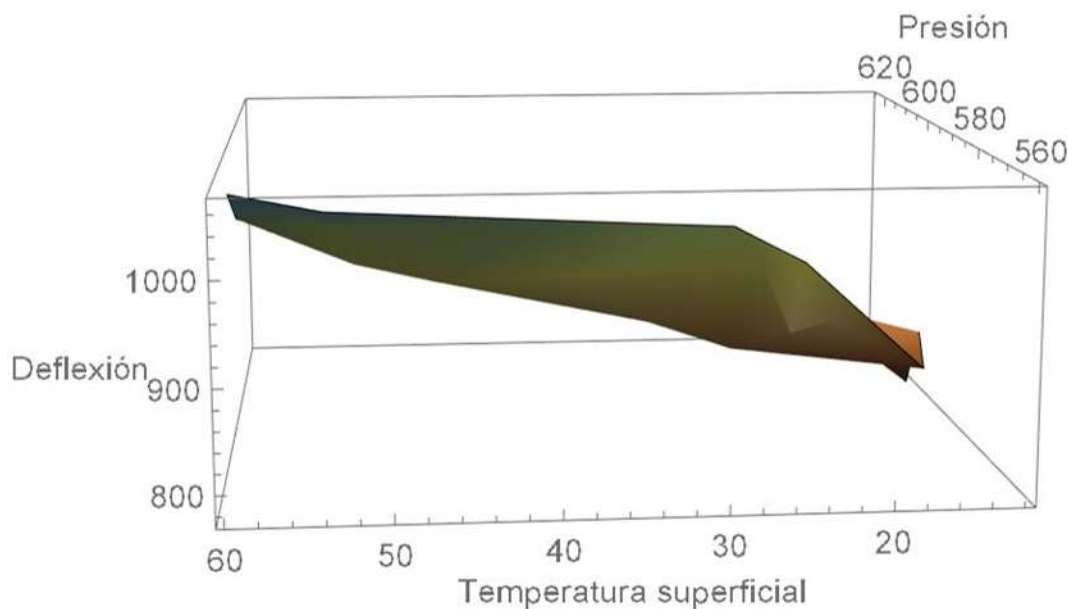


Imagen 59. 4. Gráfico 3D punto 4

A partir de estos gráficos se puede ver una sábana de dispersión de los datos en la que se evidencia que efectivamente la relación de deflexión y temperatura no es lineal pues igualmente con la variable de presión se ven comportamientos que no poseen buena relación entre ellos.

5.12 Procedimiento con metodologías de algunos autores

A continuación, se presenta un procedimiento metodológico para la formulación de una ecuación de normalización de temperatura propuesta por diversos autores. Pues los autores Chen et al. (2000), Straube & Jansen (2009), Pérez (2015) y Březina (2022) realizaron algunas pruebas de campo para encontrar un comportamiento lineal entre la deflexión máxima y la temperatura superficial. De esta relación, la gran mayoría de los autores de la literatura obtienen una fórmula de corrección a la temperatura superficial en el momento de ejecución de las pruebas de deflectometría de orden lineal. Sin embargo, otros autores como Kim (1995) después de llevar a cabo las pruebas de campo encuentran, en esta relación, una fórmula de orden exponencial.

Por tal motivo, se aplica la misma metodología para hallar una fórmula de normalización de la temperatura por el método de Pérez (2015) propuesto por el Instituto Mexicano del Transporte a los datos obtenidos de las pruebas de campo. Como se mencionó anteriormente,

este método es muy similar con respecto a los artículos consultados en la revisión de literatura además de que es un método aplicado en una pista de prueba ubicada en el mismo país de este estudio, México. Este ajuste se trata de hacer un ajuste lineal a los datos partiendo de que no se ha encontrado dicha linealidad.

De los resultados obtenidos en las pruebas de campo durante los 3 días se obtiene la relación de deflexiones $D_n/D_{n20^\circ C}$ en donde D_n es la deflexión a cualquier temperatura en el sensor n , que en este caso es tomada en cuenta la deflexión máxima en el sensor 1 y $D_{n20^\circ C}$ es la deflexión a la temperatura de referencia de $20^\circ C$ o cercana a ella.

De los 4 puntos de prueba se eligió la deflexión tomada a la temperatura de referencia siendo la más cercana a los $20^\circ C$, posteriormente se realizó la relación mencionada de las deflexiones de la cual se obtuvo los siguientes resultados de cada día presentados en las tablas 15, 16 y 17.

Tabla 15. Resultados de coeficiente del día 1

PUNTO TEMP. REFERENCIA RELACIÓN	1		2		3		4	
	19.9		21.4		21		20	
	D_n/D_{n20°	T. Superficial	D_n/D_{n20°	T. Superficial	D_n/D_{n20°	T. Superficial	D_n/D_{n20°	T. Superficial
	0.812	11.6	0.898	12.9	1.045	12.3	0.922	12.7
	1.098	11.6	0.896	12.7	0.946	12.5	0.895	12.3
	1.032	11.9	0.915	12.7	0.902	12.1	0.982	12.6
	0.971	12.3	0.903	12.8	0.918	12.7	0.956	13.4
	1.000	19.9	0.952	23.7	1.018	17.9	1.000	20
	1.053	25.1	0.922	27.1	1.005	24.1	1.001	27.4
	1.014	29.5	0.936	32.8	1.008	30.7	1.028	32.7
	1.027	37.4	0.945	39.6	1.094	37.7	1.088	39.1
	0.934	29.2	1.003	47.9	1.103	46.1	1.097	47.1
	1.073	49.5	1.004	54.6	1.104	52.5	1.187	53.6
	1.097	51.8	1.067	55.3	1.183	51.9	1.126	52.2
	0.950	52.1	1.051	58.3	1.131	57.3	1.198	59.2
	1.073	44.7	0.995	59.9	1.146	56.8	1.236	59.5
	1.075	47.6	0.998	56	1.143	51.2	1.224	53.9
	1.142	37.4	0.957	42.5	1.104	39.2	1.200	41
	1.049	33.2	1.008	37.9	1.129	36.6	1.127	36.3
	1.001	30.7	1.017	36.7	1.104	34.2	1.192	32.8
	1.060	27	0.975	30.8	1.098	28.6	1.184	28.9
	1.024	24.7	0.980	27.9	1.052	26.3	1.127	26.6
	0.917	23	1.004	25.7	1.124	24.6	1.050	24.8
	0.905	22.1	0.954	24	1.023	23.5	1.134	24
	0.908	19.9	1.000	21.6	1.000	21	1.042	20.8

Tabla 16. Resultados de coeficiente del día 2

PUNTO TEMP. REFERENCIA RELACIÓN	1		2		3		4	
	20.2		20.5		20		19.9	
	Dn/Dn20°	T. Superficial	Dn/Dn20°	T. Superficial	Dn/Dn20°	T. Superficial	Dn/Dn20°	T. Superficial
	1.246	12.3	0.962	12.5	0.995	12.2	0.989	12.5
	1.167	11.8	1.038	11.9	0.983	11.9	0.981	12.6
	2.361	11.4	1.791	12.4	0.780	12.4	2.175	12.8
	1.037	11.9	0.854	12.6	0.836	12.6	0.808	13.1
	1.120	14.3	0.850	14.8	0.848	14.8	0.851	15.3
	1.066	19.3	1.000	20.5	1.000	20	0.980	20.4
	1.214	22.7	1.092	24.6	1.148	23.9	0.965	24.7
	1.151	36.2	1.025	43.3	1.107	42.8	1.072	44.4
	1.018	45.8	1.076	47.8	1.144	46.1	1.021	47.6
	1.166	47.3	1.097	50	1.194	49.2	1.107	49.4
	1.167	56.2	1.051	57.4	1.165	55.4	1.141	56.1
	1.313	44.7	1.158	53	1.183	54.9	1.097	54.6
	1.174	40.1	1.155	53.4	1.128	52.4	1.098	53.3
	1.308	40.6	1.079	53.6	1.181	53.2	1.118	51.6
	1.214	42.9	1.147	47.9	1.185	47.5	1.164	48.4
	1.199	34.2	1.100	41.9	1.069	37.7	1.080	34.5
	1.276	29.8	1.084	36.5	1.107	32.1	1.139	31.2
	1.072	24.1	1.082	27.9	1.105	26.1	1.099	25.7
	0.951	22.2	1.039	25.2	1.125	24.1	1.129	23.9
	1.000	20.2	1.044	22.3	1.112	21.2	1.123	21.1
	1.087	19.8	1.009	20.8	1.094	19.9	1.000	19.9

Tabla 17. Resultados de coeficiente del día 3

PUNTO TEMP. REFERENCIA RELACIÓN	1		2		3		4	
	20.2		20.5		20.5		19.9	
	Dn/Dn20°	T. Superficial	Dn/Dn20°	T. Superficial	Dn/Dn20°	T. Superficial	Dn/Dn20°	T. Superficial
	1.122	8.6	-	-	1.059	8.9	-	-
	0.971	7.4	-	-	0.990	8.4	-	-
	1.180	7.7	-	-	0.998	8.2	-	-
	1.196	14.1	-	-	0.984	10.4	-	-
	1.000	20.2	-	-	1.000	20.5	-	-
	0.924	34.9	-	-	1.062	36	-	-
	0.870	44.7	-	-	1.087	47.2	-	-
	1.080	43.6	-	-	1.145	44.8	-	-
	1.388	50.8	-	-	1.225	51.5	-	-
	1.130	54.3	-	-	1.144	51.4	-	-
	0.953	59.3	-	-	1.204	58.1	-	-
	1.197	49.5	-	-	1.235	53.1	-	-
	1.186	40.5	-	-	1.220	57.1	-	-
	1.124	45.7	-	-	1.202	51.3	-	-
	0.996	37.3	-	-	1.158	40.3	-	-
	0.933	28.4	-	-	1.192	30.2	-	-
	1.032	25.3	-	-	1.125	27.1	-	-
	0.867	24.6	-	-	1.080	26.4	-	-
	1.067	22.2	-	-	1.116	23.4	-	-
	1.059	21.3	-	-	1.113	22.5	-	-

A partir de esto, se pudieron ver diferentes puntos importantes entre los comportamientos de las deflexiones en función de la temperatura a lo largo de los 3 días de prueba:

1. A pesar de que en el primer día había una temperatura superficial igual correspondiente a 19.9°C en dos datos tomados de deflexión, sus valores de deflexión máxima son bastante diferentes, por lo que esta variable de temperatura superficial

no incidió directamente en la respuesta del sistema del pavimento debido a que se trataba del mismo punto de estudio.

2. Se registraron temperaturas de referencia iguales en el mismo punto de análisis con la particularidad de que fueron realizadas en diferente día, sin embargo, tampoco se observó relación en sus valores de deflexión máxima.

Cabe señalar que la ausencia de datos del segundo y cuarto punto en el tercer día de prueba se debe a que la temperatura superficial más cercana a los 20°C era de 23.4°C y 22.2°C respectivamente. Por lo que eran valores bastante alejados de la temperatura de referencia inicial y podía influir totalmente en el análisis.

En búsqueda de la ecuación de ajuste para el sensor 1 se realizaron los gráficos correspondientes de la relación de deflexiones para diferentes temperaturas superficiales de evaluación. Así como el gráfico de la imagen 60 que representa el resultado de esta relación en el punto 1 del primer día de mediciones.

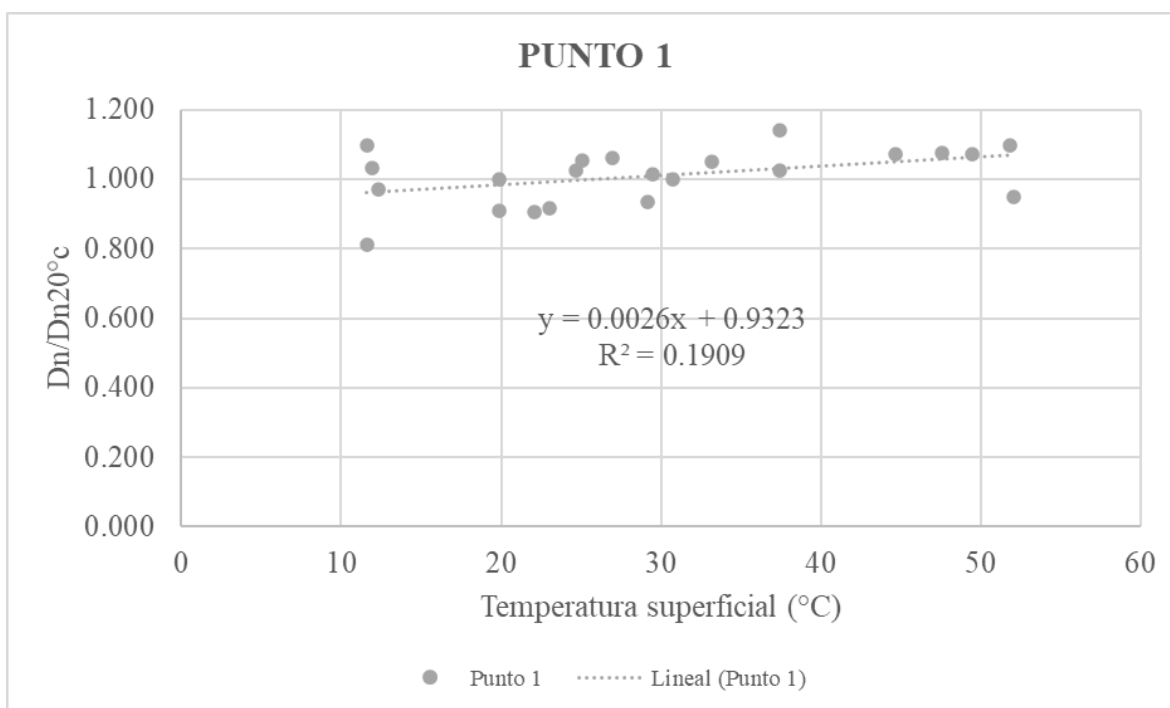


Imagen 60. Relación coeficiente de corrección y temperatura superficial con ajuste lineal

Los resultados de los gráficos que muestran la ecuación de ajuste de cada uno de los puntos de los días de medición son: ver tabla 18.

Tabla 18. Resultados de ecuación de ajuste y coeficiente de correlación lineal de los 3 días

DÍA	PUNTO	ECUACIÓN OBTENIDA	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL
1	1	$0.0026x+0.9323$	0.1909
	2	$0.0022x+0.8929$	0.579
	3	$0.0042x+0.9273$	0.6863
	4	$0.0053x+0.9151$	0.6606
2	1	$-0.0032x+1.2963$	0.0241
	2	$0.0006x+1.0635$	0.0028
	3	$0.0057x+0.8895$	0.577
	4	$-0.0005x+1.1181$	0.001
3	1	$0.0009x+1.0359$	0.0118
	3	$0.004x+0.9817$	0.7098

Esta relación lineal de las dos variables mostrada en la tabla 18 sigue siendo bastante regular y las ecuaciones obtenidas no son fiables; pues su coeficiente de correlación no demuestra mayor certidumbre. Realizar esta prueba con la metodología de obtención de ajuste descrita en la literatura, era útil debido a que además de demostrar el procedimiento usado por los autores con sus propios datos de campo y reproducirlo con datos de campo de esta investigación, se tenía como hipótesis mejorar la relación lineal de las dos variables (deflexión y temperatura superficial) con respecto a un valor de referencia.

5.13 Tratamiento de datos mediante el conjunto de datos

Partiendo de que el comportamiento de la relación de deflexión máxima y temperatura superficial no se ajusta a una relación lineal en ninguno de los dos casos: ni en las deflexiones obtenidas de diferentes tramos carreteros de las carreteras nacionales, ni de las pruebas de campo realizadas en un ambiente controlado, se busca comprender cual es el comportamiento que mejor se adapta a esta relación.

Para buscar el comportamiento que mejor se ajusta, primero se debían analizar los datos del estudio de las pruebas de campo pues venían de un ambiente controlado y hay mayor información de las variables. De esta manera, se juntaron los datos obtenidos de los tres días

por cada punto con el objetivo de realizar un tratamiento a los datos mediante el método de segmentación de datos. La segmentación de datos puede realizarse de diferentes maneras (SAS, 2012) menciona que se pueden agrupar por características o atributos similares. Comenta que la generación de listas simples a menudo agrupa a los destinatarios en grupos basados en puntos en común; no implica algoritmos, puntuación o información dinámica basada en eventos, más bien, se puede realizar por comportamiento.

Por ello, la segmentación realizada consistió en la creación de conjuntos de datos con el uso de ventanas (segmentos) a cada 3.4°C de temperatura superficial. De esta manera se abarcaban 3 ventanas por cada 10°C . De las ventanas, la que tuviera menos de 3 datos era tomada como dato no representativo. De lo contrario, los datos pertenecientes de deflexiones del primer sensor y la temperatura superficial dentro de las ventanas se promediaban obteniendo un valor promedio de estos datos por segmento de datos.

A continuación, se ilustra un ejemplo de este procedimiento de segmentación realizado para el punto 1:

Primero se reúnen todos los datos de los tres días correspondientes al punto 1 de prueba. Ver imagen 61.

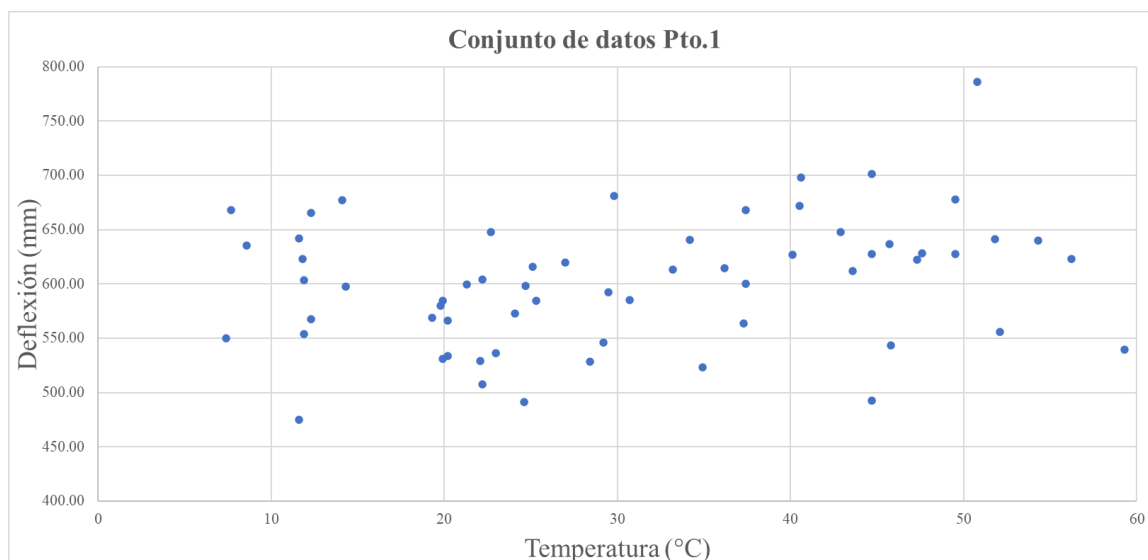


Imagen 61. Datos sin tratamiento (crudos) del punto 1

Se realiza la segmentación de los datos mediante la representación de ventanas homogéneas. Ver imagen 62.

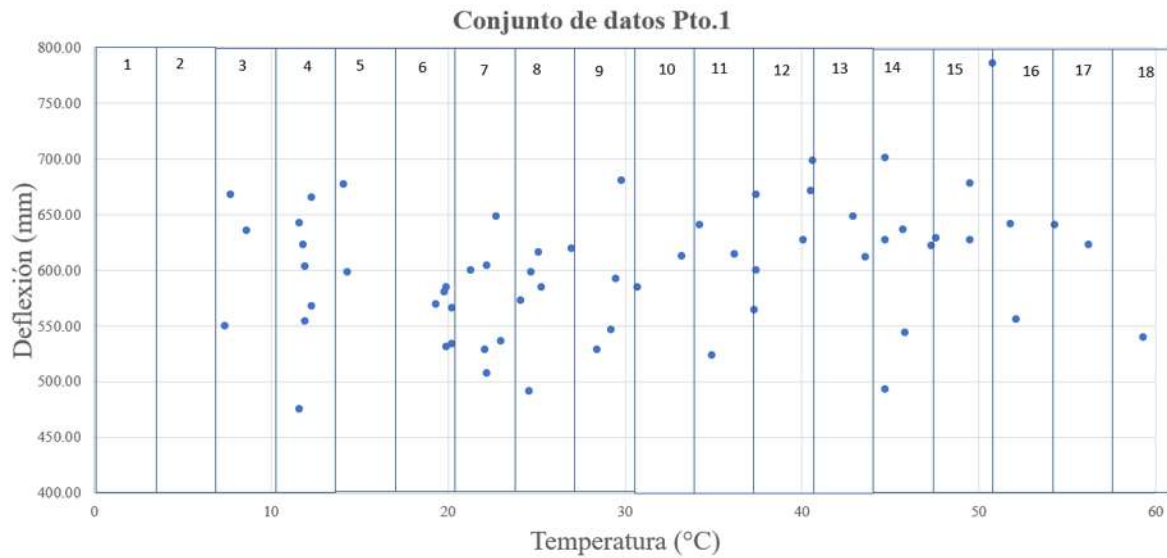


Imagen 62. Gráfico de ventanas de datos y segmentación de datos del punto 1

Posteriormente se promedian los valores de temperatura y deflexión por segmento teniendo como resultado lo mostrado en la tabla 19.

Tabla 19. Resultado de los valores por ventana de datos del punto 1

# Segmento	Promedio temperatura	Promedio deflexión
1		
2		
3	7.9	617.97
4	11.91	590.06
5		
6	19.88	560.85
7	22.25	570.80
8	25.13	580.43
9	29.52	586.68
10		
11	36.23	601.68
12	40.4	665.57
13		
14	45.48	604.03
15	48.87	644.63
16		
17		
18		

Finalmente, se presenta el siguiente gráfico de la imagen 63 con los resultados del tratamiento de los datos.

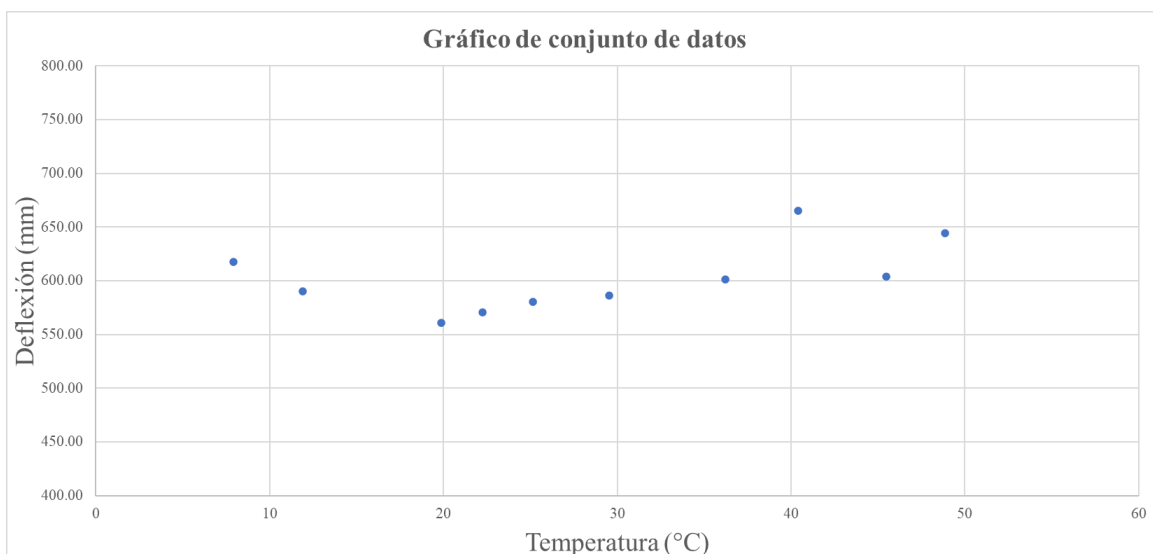


Imagen 63. Gráfico de resultado después del procesamiento de datos

5.14 Análisis del comportamiento de deflexión máxima y temperatura superficial

En el programa Wolfram Mathematica se introdujeron los datos tratados mediante el criterio de conjunto de datos mostrados en la tabla 19 correspondientes al punto de prueba número 1. A partir de ello, se realizó el análisis de la relación entre deflexiones y temperatura de manera que se pueda buscar una fórmula que represente el comportamiento que mejor se adapte.

Importando los datos obtenidos al software se realiza el gráfico del conjunto de datos del punto de prueba número 1, así como se muestra en la imagen 64.

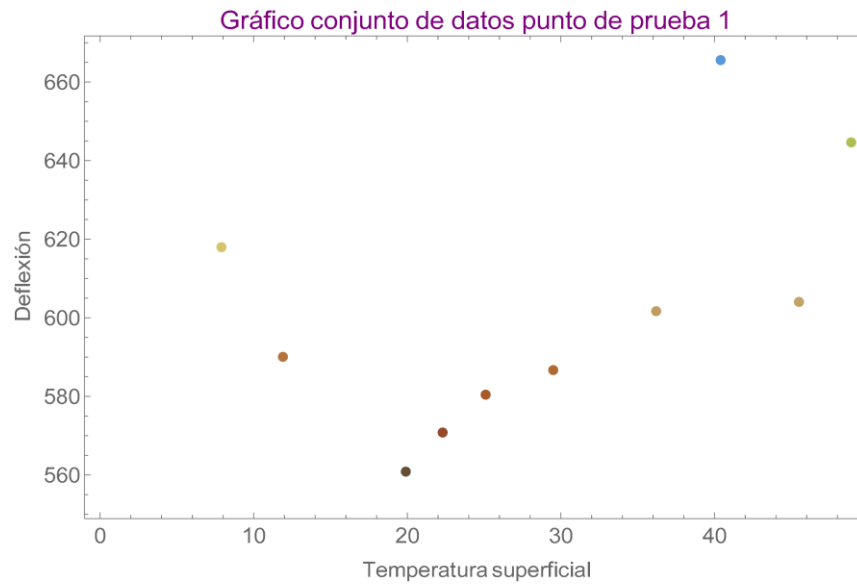


Imagen 64. Gráfico en Wolfram Mathematica del conjunto de datos del punto de prueba 1

En primera instancia se podía observar que finaliza en un comportamiento exponencial, por lo que se realizó un ajuste a una fórmula de orden exponencial con la forma mostrada en la ecuación 19:

$$B - A(x - x_0)e^{\frac{-(x-x_0)^2}{b}} \quad (19)$$

Mediante el ajuste en el software (Bestfit) se busca un ajuste de esta fórmula en la que se proponen las constantes para las variables B, A, X0, b con el fin de observar el gráfico representativo de esta función.

En la imagen 65 muestra los comandos utilizados para llevar a cabo el gráfico de la función exponencial:

```
In[ ]:= Bestfit[data, B - A e- $\frac{(x-x_0)^2}{b}$  (x - X), {a, b, A, B}, {x}]
```

```
l = B - A (x - x0) Exp[- (x - a) ^2 / (b) ]
```

[exponencial]

```
Bestfit[data, B - A e- $\frac{(x-x_0)^2}{b}$  (x - X), {a, b, A, B}, {x}]
```

```
Out[ ]:= B - A e- $\frac{(-a+x)^2}{b}$  (x - x0)
```

```
In[ ]:= Plot[3 - 2 (x - 1) Exp[- (x - 1) ^2 / (10) ], {x, -10, 10}]
```

[representación gráfica] [exponencial]

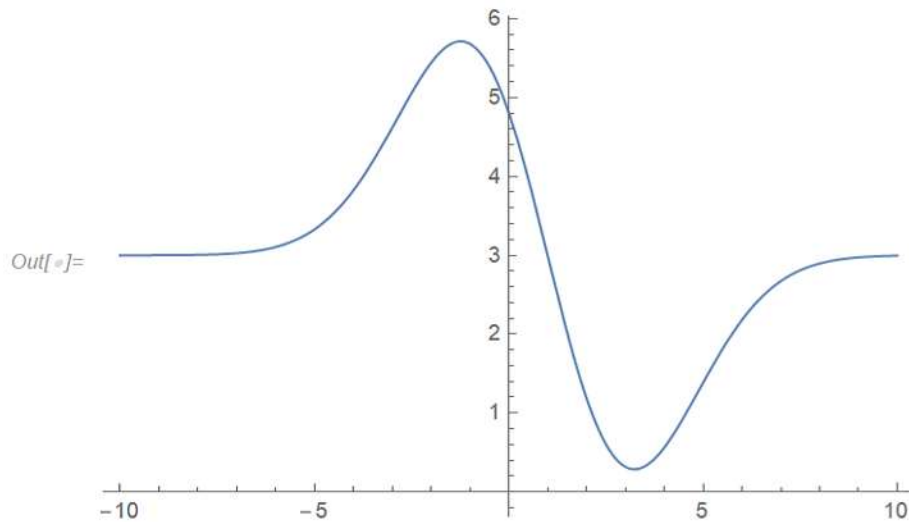


Imagen 65. Gráfico exponencial y comandos utilizado para gráfica exponencial

Sin embargo, importando los datos de los otros 3 puntos de prueba en el software Wolfram Mathematica, se ejecuta su gráfico correspondiente donde se destaca otro comportamiento dominante que no es parecido al comportamiento de la función exponencial del grafico mostrado en la imagen 65.

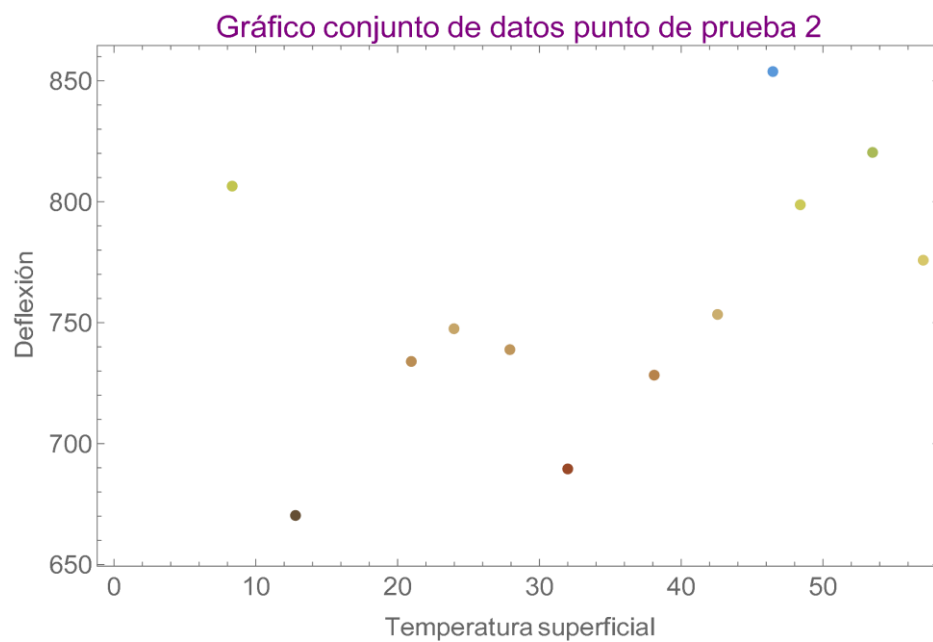


Imagen 66. Gráfico conjunto de datos del punto de prueba 2

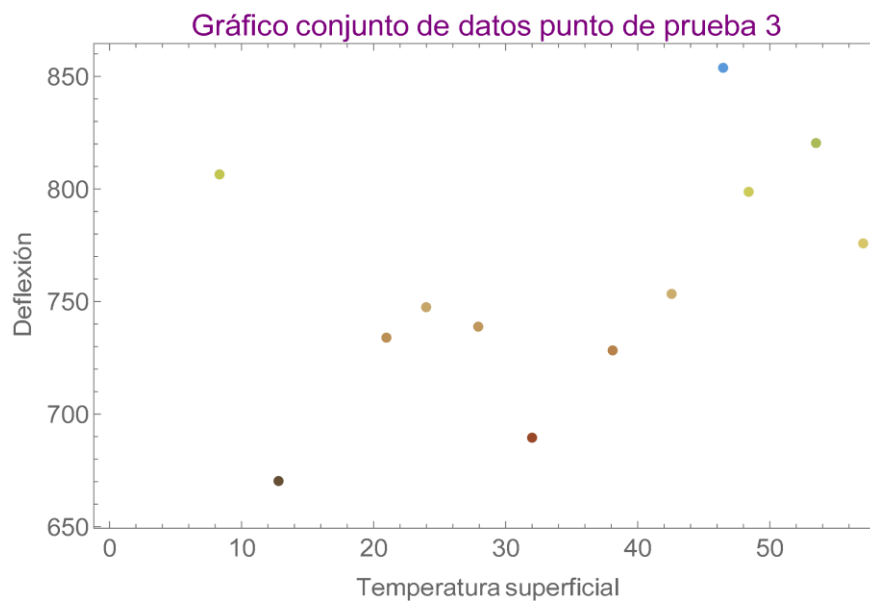


Imagen 67. Gráfico conjunto de datos del punto de prueba 3

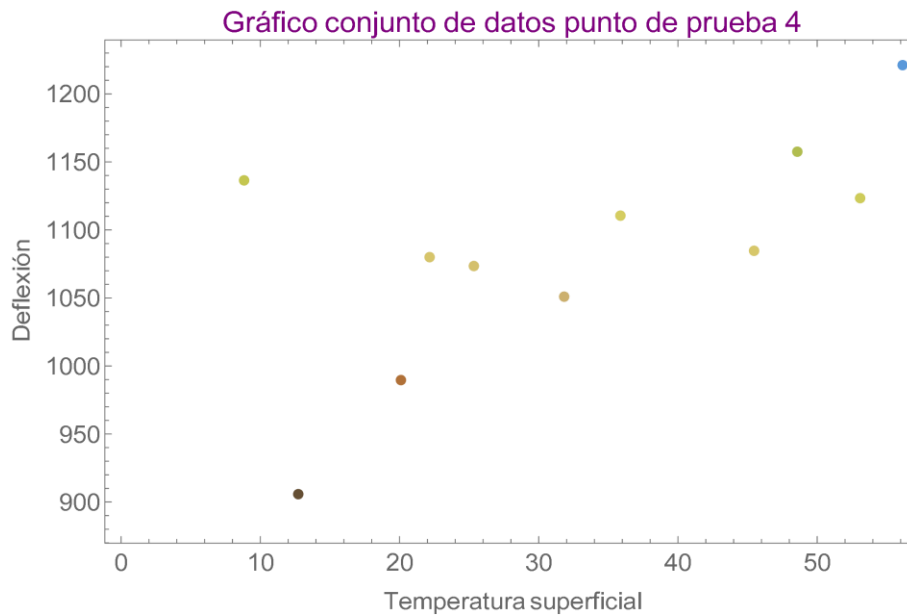


Imagen 68. Gráfico conjunto de datos del punto de prueba 4

En los gráficos mostrados previamente (ver imagen 66, 67 y 68) se resaltan puntos altos y bajos por lo que al gráfico del conjunto de datos del punto 1 se realiza un ajuste senoidal de manera que se pueda observar cómo se aproxima a los datos.

Este ajuste tiene como propósito proponer una ecuación de la función seno a partir de coeficientes que ayuden a definir los parámetros correspondientes a esta función senoidal. Estos son: (Hely Pérez, 2018)

“Amplitud A: Esta representa la mitad de la distancia entre los valores máximo y mínimo de la función.

Periodo T: Representa la medida del ángulo en el cual la gráfica completa un ciclo.

Fase F: Representa la medida del ángulo en que la gráfica se desplaza horizontalmente”

De acuerdo a ello se propone la ecuación 20 con la forma:

$$A + B * \sin[b * x - X0] \quad (20)$$

Los coeficientes propuestos gráficamente cumplen las siguientes funciones en la ecuación senoidal:

A: Varía la amplitud de la onda de la función senoidal

B: Desplaza la onda en el eje y

$b \cdot x$ = Describe el periodo de elongación

X_0 = Representa la fase, moviendo de lado a lado la función. No obstante, este valor tiene un significado importante ya que representa a x en el origen. Es decir, en casos de que la función esta desplazada del origen, hace que el origen se regrese a 0, dándole un nuevo punto de inicio a la función seno.

En el software se realiza un ajuste a la ecuación mostrada anteriormente (ecuación 20) por medio de la programación a un modelo no lineal (NonLinearModelFit). De esta manera, se obtienen los valores de los coeficientes (A, B, b y X_0). Estos valores integran la fórmula de ajuste a la función seno del gráfico mostrado en la imagen 64 la cual es la siguiente:

$$\text{FittedModel} \left[603.662 - 33.1536 \sin[23.0839 + 0.156136 x] \right] \quad (21)$$

De acuerdo a lo mostrado previamente A obtiene el valor de: 603.662, B de: -33.1536. b de: 0.156136 y X_0 de: 23.0839.

Por medio del siguiente código de programación (ver imagen 69) se tiene como resultado el gráfico con el ajuste obtenido mostrado en la imagen 70:

```
"C:\\Users\\Andrea Salinas\\Desktop\\Maestria\\Tesis\\Avance cuarto semestre\\Deflexiones controladas\\Deflexiones\\Pruebas
conjunto de datos.csv"]

Out[ ]:= {{7.9, 617.97}, {11.91, 590.06}, {14.2, 637.55}, {19.88, 560.85}, {22.25, 570.8}, {25.13, 580.43}, {29.52, 586.68}, {33.2, 613.},
{36.23, 601.68}, {40.4, 665.57}, {43.25, 629.95}, {45.48, 604.03}, {48.87, 644.63}, {51.95, 598.5}, {55.25, 631.75}, {59.3, 539.9}}

In[ ]:=
Data0 = {{7.9, 617.97}, {11.91, 590.06}, {14.2, 637.55}, {19.88, 560.85}, {22.25, 570.8}, {25.13, 580.43}, {29.52, 586.68},
{33.2, 613.}, {36.23, 601.68}, {40.4, 665.57}, {43.25, 629.95}, {45.48, 604.03}, {48.87, 644.63}, {51.95, 598.5},
{55.25, 631.75}, {59.3, 539.9}};
nlm = NonlinearModelFit[Data0, A + B Sin[b x - X0], {A, B, b, X0}, x]
ajusta a modelo no lineal      seno

Show[ListPlot[Data0], Plot[nlm[x], {x, 7, 60}], Frame -> True, FrameLabel -> {"Temperatura superficial", "Deflexión"},
mue- representacion de lista representacion grafica marco verd- etiqueta de marco
PlotLabel -> Style["Gráfico de la Función Senoidal de las pruebas de campo", Red], LabelStyle -> {FontSize -> 14}]
etiqueta de r- estilo rojo estilo de etiqueta tamaño de tipo de letra

Out[ ]:= FittedModel[603.662 - 33.1536 Sin[23.0839 + 0.156136 x]]
```

Imagen 69. Programación para generar gráfico senoidal del punto 1 de prueba

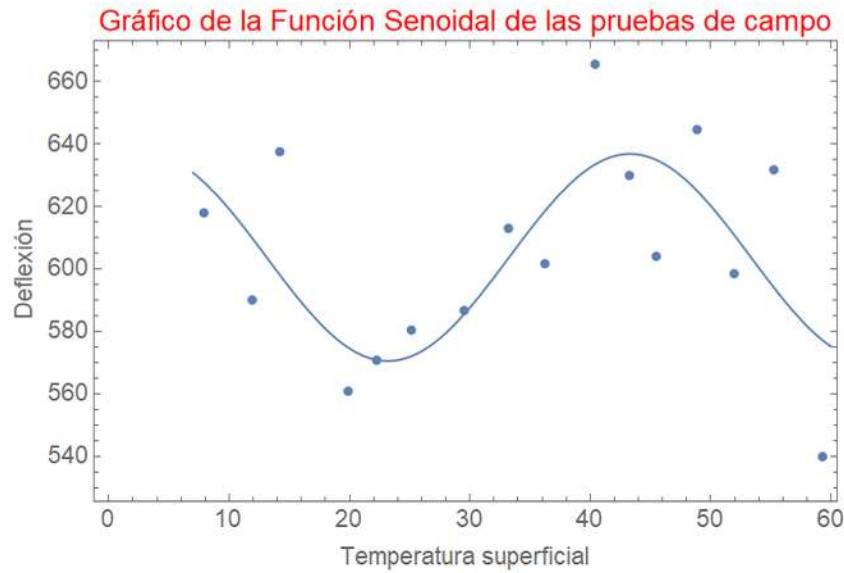


Imagen 70. Gráfico resultante de la función senoidal de las pruebas de campo

Con el fin de mostrar la variación de la onda de la función seno, se parte del punto (0,0) que representa una deflexión 0 y una temperatura 0, hecho que asimila una condición inicial. Con esta variación se observar que el ajuste es bastante bueno entre los puntos y la función graficada. Ver imagen 71.

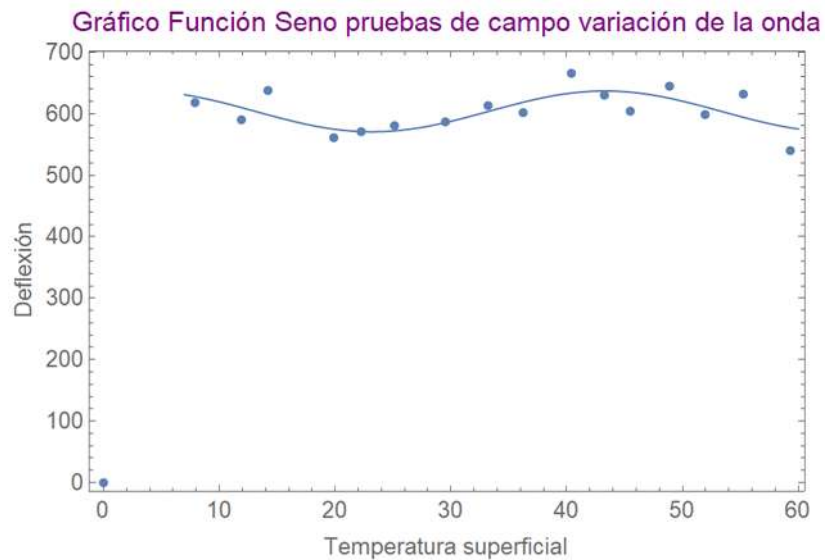


Imagen 71. Gráfico senoidal con variación de onda partiendo del punto 0,0

Por medio del tratamiento por el método de segmentación de datos, elaborado para los tramos representativos de cada corredor carretero nacional, se representó gráficamente el comportamiento de cada corredor.

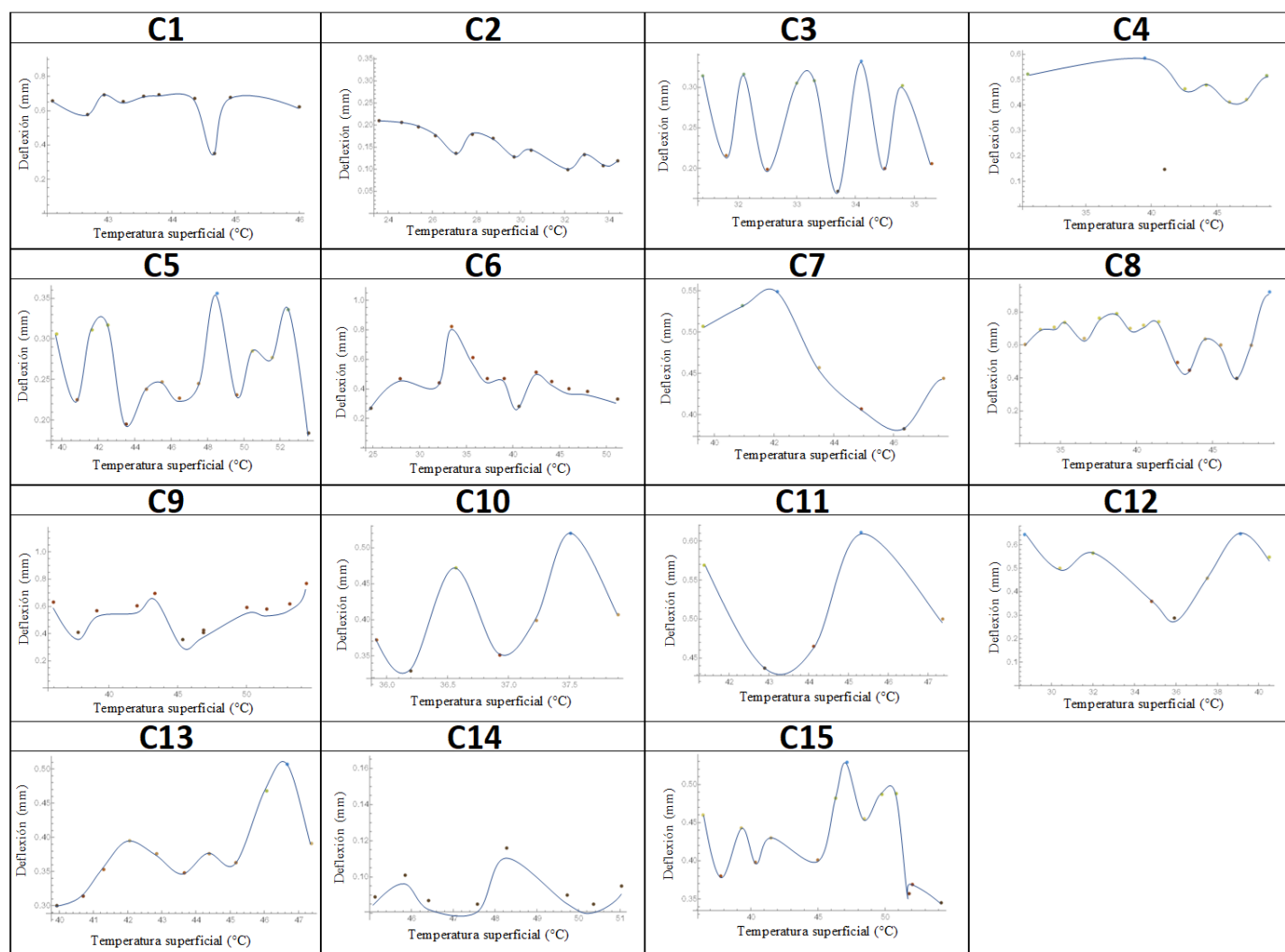


Imagen 72. Comportamiento de los 15 tramos representativos de los corredores carreteros

Aparentemente, en la imagen 72 se puede evidenciar que igual a los resultados de las pruebas de campo, su comportamiento es senoidal y se pudiese relacionar con la fórmula obtenida de las pruebas de campo. Así mismo, se percibe que en algunos tramos como el C3, C5, C10, C11 y C13 las curvas representan gráficamente la función senoidal.

Conclusiones

En este trabajo se analizaron 8 ecuaciones de ajuste con diferencias entre espesores, temperaturas y coeficientes de corrección. Pues de acuerdo a la bibliografía, los autores encuentran a 20°, 21° y 25° Celsius la temperatura predominante; esta temperatura está asociada a la temperatura media anual del país de estudio.

De la comparativa gráfica se destaca que cuando las deflexiones son mayores a 0.400, las fórmulas tienen una alta dispersión de corrección entre ellas, pues algunas son más estrictas en rigidizar el valor de deflexión y otras en mantener el valor obtenido de la deflexión sin normalizar. Así mismo, se probó encontrar un valor en porcentaje de corrección de las fórmulas, pero ninguna tiene un comportamiento homogéneo de normalización. Sin embargo, se evidenció que en deflexiones tomadas a temperaturas apegadas a los 21°C su normalización y dispersión de las fórmulas es muy pequeña.

De las 8 ecuaciones analizadas se puede ver que, por medio de la corrección por temperatura, algunas deflexiones que estaban en un criterio de rechazo (por debajo de 0.400 mm), con las fórmulas de corrección, se corrigen a un criterio de aceptación (arriba de 0.400 mm). Debido a lo anterior y evaluando distintas fórmulas se puede deducir que cuando se requiera hacer una normalización de temperatura en la que los valores de deflexión deban cumplir estrictamente con el parámetro de cumplimiento establecido en la normativa, se recomienda usar la fórmula del autor Breziña et al., (2022). Contrario a esto, en casos donde se requiera una normalización por temperatura más flexible y apegada a los valores de deflexiones obtenidos en campo, se propone usar la fórmula de Kim et al., (1995). De igual modo, la fórmula recomendada en el manual de deflexiones M·MMP·4·07·020/17 descrito por la SICT, sugerida por la AASHTO, es una fórmula que corrige un poco más que la de Kim et al., (1995), sobre todo se apegaba mucho en su comportamiento de normalización en las deflexiones menores a 0.400. Mientras que la fórmula de Chen et al., (2000) es la única que normaliza a una temperatura de 25 °C y, así mismo, es la única que pierde el comportamiento de los altos y bajos de las deflexiones sin normalizar; por ello, es la menos recomendable de usar debido a esta pérdida del comportamiento de origen de la deflexión.

El uso de la temperatura de predicción mediante un software especializado no fue efectivo ya que hay una amplia cantidad de variables que se desconocen de las pruebas de

deflectometría proporcionada por la base de datos de la Dirección General de Servicios Técnicos como: la hora, día y mes del año en que se ejecutaron las pruebas. Esto afecta en la precisión de la predicción pues no se podía alimentar de manera correcta el software.

Asimismo, estos modelos climáticos para el perfilamiento de temperaturas son una buena herramienta para semejar un escenario impecable, pero no se apega a condiciones de campo. No obstante, con el perfilamiento de temperatura se percibieron los gradientes de temperatura a lo largo de la profundidad total del pavimento asfáltico. Permitiendo hacer énfasis: primero en que la temperatura media de la carpeta asfáltica (temperatura efectiva) no tiene las fluctuaciones de temperatura que inciden sobre la superficie por lo que se considera un valor de temperatura más estable y segundo que en las capas granulares no hay mayor influencia de la temperatura superficial. Esto debido al conjunto de las características, la capacidad calorífica y la conductividad de los materiales que componen estas capas.

Ahora, a pesar de que el modelo de perfilamiento de temperatura tiene un proceso de extracción de datos y obtención de resultados en el programa TEMPS bastante laborioso y tardado como para reproducir este procedimiento para longitudes de tramo extensa, continúa siendo un buen método para estudiar el campo de temperatura en el pavimento asfáltico en zonas puntuales con un método no destructivo, al igual que las pruebas de medición de la deflexión ejecutadas con equipos de alto rendimiento. Contrario a hacer uso de aditamentos que requieren de una perforación en el pavimento en cada punto de estudio.

En la selección de tramos se puede concluir que ninguno de los mapas de temperaturas (media, máxima y mínima) ejemplifican una conducta de las diversas temperaturas presentadas en el país. Por ello, con el uso de datos recientes correspondientes a la temperatura media por entidad federativa y nacional realizado por la CONAGUA, se logró agrupar algunos estados de acuerdo con su comportamiento similar de temperatura media por mes y se destacó que la temperatura media nacional del año de estudio (2020) es 22.4°C. Por tal motivo corregir las deflexiones a un valor de 20°C o 21°C como lo realizan 7 de las fórmulas estudiadas, sería corregirlo a una temperatura más baja de la que actualmente se presenta en el país.

A partir de esto, se seleccionaron los tramos de acuerdo a un mapa climático el cual zonifica de mejor manera este comportamiento térmico nacional por la escala climática de Köppen.

Esta escala representa y clasifica de mejor manera las zonas, ya que es el conjunto de la humedad y la temperatura de cada estado. Así mismo, se eligieron tramos representativos de cada uno de los 15 corredores carreteros nacionales, resaltando las zonas geoeconómicas y recursos recientes al sureste del país.

Se realizaron pruebas de deflectometría en campo las cuales permitieron un ambiente controlado de los factores de influencia en las pruebas de deflexión en el que las variables como la hora exacta en la que se realizó la prueba, sombras en los puntos y la temperatura superficial fueran conocidos.

Con base en el análisis de estas pruebas de campo y los 15 tramos representativos de los corredores carreteros se evidenció una poca relación a un ajuste lineal entre la deflexión máxima y la temperatura superficial. Según lo analizado, ajustar las deflexiones a una linealidad es asumir que la temperatura es un factor determinante de la deflexión, lo cual es un error. La temperatura superficial tiene una incidencia sobre todo en materiales asfálticos, pero no es la principal determinante del comportamiento de la respuesta del pavimento. En tramos de campo no es el único parámetro que influye, pues hay otros parámetros de influencia como los distintos niveles de envejecimiento del material asfáltico, variabilidad de espesores (esto en su proceso constructivo o en intervenciones de conservación), el grado de compactación de las capas y el contenido de humedad que se pudiera presentar en capas inferiores.

Una relación lineal podría estar presente en condiciones de laboratorio completamente controladas, sin embargo, la finalidad de esta investigación fue describir los comportamientos que mejor representan las condiciones vistas en campo con todas sus variables posibles y en diferentes vialidades a nivel nacional. Como se mencionó anteriormente ajustarlo a una relación lineal es forzar a aumentar o disminuir la deflexión debido a una temperatura alta o baja cuando no necesariamente el principal factor fue la temperatura, sino que la respuesta que realmente se tuvo fue deficiente o buena, según el caso de la mecánica del material.

Del procesamiento de 2467 mediciones de deflectometría correspondientes a los 15 tramos carreteros de los ejes troncales principales y las 252 mediciones de las pruebas en un lugar puntual con información controlada se tiene como resultado una alta dispersión de los datos.

Mediante el procesamiento de estos datos se evidenció una tendencia senoidal en los gráficos; por lo que se propuso una ecuación seno que representa el comportamiento de la relación entre las dos variables (deflexión máxima y temperatura superficial). En la ecuación se consideraron coeficientes que describen los parámetros de la función senoidal para diferentes gráficos que tengan esta tendencia.

Sin embargo, es importante mencionar que se debe explorar una relación adicional como la exponencial debido que los corredores número 13 y 18 tienen el conjunto de una relación a una fórmula de orden senoidal y exponencial.

Futuras líneas de investigación

Se propone que en un trabajo a futuro se estudie el posible comportamiento que describa la relación entre deflexión máxima y temperatura superficial para diferentes estructuras de pavimento asfáltico y extrapolarlo a todos los grupos climáticos presentados en el país. Ya de manera preliminar, se encontró un comportamiento representado con la función seno, sin embargo, se recomienda estudiar otra función matemática que mejor se ajuste a esta relación.

Con el estudio de una posible relación, se puede dar paso a la creación de una metodología de ajuste que integre eficientemente todas las variables que influyen en el conjunto de la deflexión y la temperatura del pavimento asfáltico.

Referencias

- AASHTO. (1993). Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimentos. *Capítulo 5*.
- Alavi, M. Z., Pouranian, M. R., & Hajj, E. Y. (2014). Prediction of Asphalt Pavement Temperature Profile with Finite Control Volume Method. *Transportation Research Record*, 2456(1), 96-106. doi:10.3141/2456-10
- AMEVEC. (2022). Radiación solar en México. *Asociación Mexicana de Ventanas y Cerramientos*.
- Asphalt Institute. (1983). Manual para el procedimiento de deflexión. *Capítulo 4*.
- Březina, I., Machel, O., & Zavřel, T. (2022). Temperature Correction of Deflections and Backcalculated Elasticity Moduli Determined from Falling Weight Deflectometer Measurements on Asphalt Pavements. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*, 24(1).
- Bull, A. (2003). Un nuevo paradigma para la conservación vial: de hacer lo que se puede a hacer lo que es exigible, División de Recursos Naturales e Infraestructura. *Cepal*.
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). (2003). Rehabilitación de firmes, de la instrucción de carreteras. *FOM/3459/2003*.
- Chatti, K., Kutay, M. E., Lajnef, N., Zaabar, I., Varma, S., & Suk Lee, H. (2017). Enhanced Analysis of Falling Weight Deflectometer Data for Use With Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design and Analysis and Recommendations for Improvements to Falling Weight Deflectometers. *FHWA-HRT-15-063*.
- Chen, D. H., Bilyeu, J., Lin, H. H., & Murphy, M. (2000). Temperature correction on falling weight deflectometer measurements. *Transportation research record*, 1716(1), 30-39.
- Coria Gutiérrez, C. A. (2019). Delimitación de tramos homogéneos en pavimentos de carreteras y autopistas. *Benemerita Universidad de Puebla*.
- Cortés, S. L. (2019). *Retrocálculo de Módulos Elásticos Aplicado a Pavimentos Flexibles*.
- Dirección General de Servicios Técnicos. (2015). Guía de procedimientos y técnicas para la conservación de carreteras en México 2014. *Secretaría de Comunicaciones y Transportes SICT*.
- Douglas, A., Steele, P., Hyung, L., Curt, A., & Beckemeyer, A. (2020). Development of the Rolling Wheel Deflectometer (RWD). (FHWA-DTFH-61-14-H00019, Ed.) U.S. Department of Transportation.
- Espinoza Romo, J. M. (2018). Monografía de auscultación de pavimentos y caso de estudio. *Universidad de Guanajuato*.

- Federal Highway Administration Research and Technology. (2017). *Using Falling Weight Deflectometer Data With Mechanistic-Empirical Design and Analysis, Volume III: Guidelines for Deflection Testing, Analysis, and Interpretation*. U.S Department of Transportation: Federal Highway Administration.
- García, J. A., & Castro, M. (2011). Analysis of the temperature influence on flexible pavement deflection. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3530-3539.
- Giordani, C., & Leone, D. (2017). Pavimentos. *Universidad Tecnológica Nacional*.
- Gobierno de Navarra. (2014). Meteorología y climatología de Navarra. *Navarra*.
- Guo, R., Nian, T., & Zhou, F. (2020). Analysis of factors that influence anti-rutting performance of asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 254(119237).
- Hassan, J., Mousa, R., & Gadallah, A. (2003). Comparative analysis of using AASHTO and WESDEF approaches in backcalculation of pavement layer moduli. *Journal of Transportation Engineering*, 129(3), 322-329.
- Hely Pérez, D. (2018). Funciones trigonométricas 2: Amplitud, Periodo y Fase en SENO y COSENO. *Geogebra*.
- Hernández Gutiérrez, E. (2005). Pavimentación de la carretera México-Tuxpan. *Instituto Politécnico Nacional*.
- Higuera Sandoval, C. H. (2009). Caracterización de la resistencia de la subrasante con la información de deflectómetro de impacto. *Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*, 9(28), 73-92.
- Hoffman, M., & Del Aguila, P. (1985). ESTUDIOS DE EVALUACION ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS BASADOS EN LA INTERPRETACION DE CURVAS DE DEFLEXIONES (ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS).
- Kim, Y. R., Hibbs, B. O., & Lee, Y. C. (1995). Temperature correction of deflections and backcalculated asphalt concrete moduli. *Transportation Research Record*.
- Liao, J., Lin, H., Li, Q., & Zhang, D. (2019). A Correction Model for the Continuous Deflection Measurement of Pavements under Dynamic Loads. *IEEE Access*, 7, 154770-154785.
- Lingen Felder, L. (2022). *7 Tipos de grietas en el asfalto y sus soluciones*. Guadalupe N.L.
- López Niño, J. S. (2017). Estudio para la rehabilitación del tramo desde la calla 245 hasta el peaje Andes de la Abcisa Km 1+700 A Km 2+800 sentido sur norte basados en métodos de retrocálculo. *Universidad Militar Nueva Granada*.
- Lukanen, E., Stubstad, R., & Clevenson, M. (2005). Pavement Temperatures. *LTPP U.S. Department of Transportation*.

- Macea Mercado, L. F., Morales, L., & Marquéz Díaz, L. (2022). Un sistema de gestión de pavimentos basado en nuevas tecnologías para países en vía de desarrollo. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 17(2).
- Mamani Arcata , S. M., & Pilco Chura, W. C. (2021). Evaluación estructural por deflectometría e IRI para determinar la vida remanente del pavimento flexible en la av. Circunvalación Puno, 2021. *Universidad César Vallejo*.
- Mendoza Sánchez, J., Adame Valenzuela, E., Gradilla Hernández, L., Alonso Guzmán, E., & Marcos Palomares, O. (2021). Sistema de Información Climática para el Diseño de Infraestructura Carretera. *Instituto Mexicano del Transporte*.
- Organización Metereológica Mundial. (17 de Mayo de 2023). Las temperaturas mundiales batirán récords en los próximos cinco años. *Comunicados de Prensa*.
- Pais, J., Santos, C., Pereira, P., & Kaloush, K. (2020). The adjustment of pavement deflections due to temperature variations. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(13), 1585-1594.
- Park, D. Y., Buch, N., & Chatti, K. (2001). Effective layer temperature prediction model and temperature correction via falling weight deflectometer deflections. *Transportation Research Record*, 1764(1), 97-11.
- Pérez, A., Garnica, P., García, R., & Cruz, S. (2015). Influencia de la temperatura en la determinación de la capacidad estructural de pavimentos flexibles. *Instituto Mexicano del Transporte*, 152(Artículo 3).
- Qin, Y. (2016). Pavement surface maximum temperature increases linearly with solar. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 391-399.
- Qin, Y., & Hiller, J. (2011). Modeling temperature distribution in rigid pavement slabs: Impact of air temperature. *Construction and Building Materials*, 25(9), 3753-3761.
- Rakesh, N., Jain, A. K., Reddy, M. A., & Reddy, K. S. (2006). Artificial neural networksgenetic algorithm based model for backcalculation of pavement layer moduli. *International Journal of Pavement Engineering*, 7(3), 221-230.
- Ramos García, J. (2015). Influencia de la temperatura en la deflexión de firmes flexibles. *Universidad Politécnica de Madrid* .
- Rubicon solutions. (2023). Efecto corte del sensor 2 en el deflectómetro de impacto.
- Salinas Rodríguez, M. (2018). La sierra madre oriental como reservorio de diversidad vegetal.
- Saltan , M., Terzi, S., & Küçüksille, E. (2011). Backcalculation of pavement layer moduli and Poisson's ratio using data mining. *Expert Systems with Applications*, 38, 2600–2608. doi:10.1016/j.eswa.2010.08.050
- SAS. (2012). Segmentación de datos.

- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2017). N·CSV·CAR·1·03·010/17. Determinación de las Deflexiones de un pavimento (DEF). *Conservación* . Normativa IMT.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2017). MMP Métodos de Muestreo y prueba de materiales. *M·MMP·4·07·020/17*. Determinación de las Deflexiones con Equipo de Impacto.
- Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. (2021). Tabulador de costos paramétricos para la construcción y modernización de la infraestructura carretera 2021.
- Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. (2022). Realiza SICT Programa de Auscultación de la Red Carretera Federal 2022. *Gobierno de México*.
- Shao, L., Park, S., & Kim, Y. (1997). Simplified Procedure for Prediction of Asphalt Pavement Subsurface Temperatures Based on Heat Transfer Theories. *Transportation Research Record*, 114–123.
- Silva Balaguera, A., Daza Leguizamón, O., & Lopez Valiente, L. (1 de Septiembre de 2018). Gestión de pavimentos basado en sistemas de información geográfica (sig): una revisión. *Ingeniería solidaria*, 14(26), 1-18. doi:10.16925/in.v14i26.2417
- Straube, E., & Jansen, D. (2009). Temperature correction of falling-weight-deflectometer measurements. In. *Proceedings of the 8th International Conference Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, 789-798.
- Van Gurp, C. (1995). *Characterization of seasonal influences on asphalt pavements with the use of Falling Weight Deflectometer*. Delft: University of Technology Faculty of Civil Engineering.
- Vidal Zepeda, R. (1990). Temperatura Media Anual de México.
- Zepeda Vidal , R. (1990). *Temperatura media anual*. (A. N. México, Ed.) Obtenido de Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Zheng, Y., Zhang, P., & Liu, H. (2019). Correlation between pavement temperature and deflection basin form factors of asphalt pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(8), 874-883.

Anexos

Anexo 1. Base de datos de la DGST del tramo 1 Morelia - Guadalajara (ejemplo)

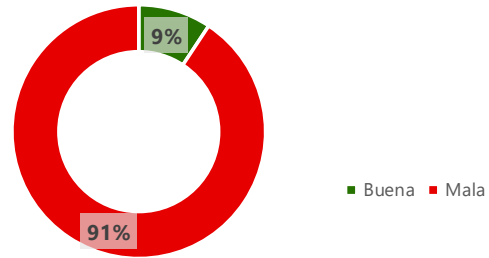


“OBTENCIÓN DE ELEMENTOS PARA EL PRONÓSTICO DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LOS PAVIMENTOS (DEFLEXIONES) EN DIVERSOS TRAMOS DE LA RED CARRETERA FEDERAL 2020: AUTOPISTAS (RED CONCESIONADA Y RED CAPUFE), CORREDORES CARRETEROS, RED BÁSICA LIBRE Y RED SECUNDARIA”

Clave: JAL015E5-CT1-118.9-136.0
Carretera: Morelia - Guadalajara
Tramo: Lim Edos Mich/Jal - Guadalajara (Cpo. B)
Longitud [km]: 17.1
de impactos: 86

Sentido
S2

Resumen | Deflexión normalizada



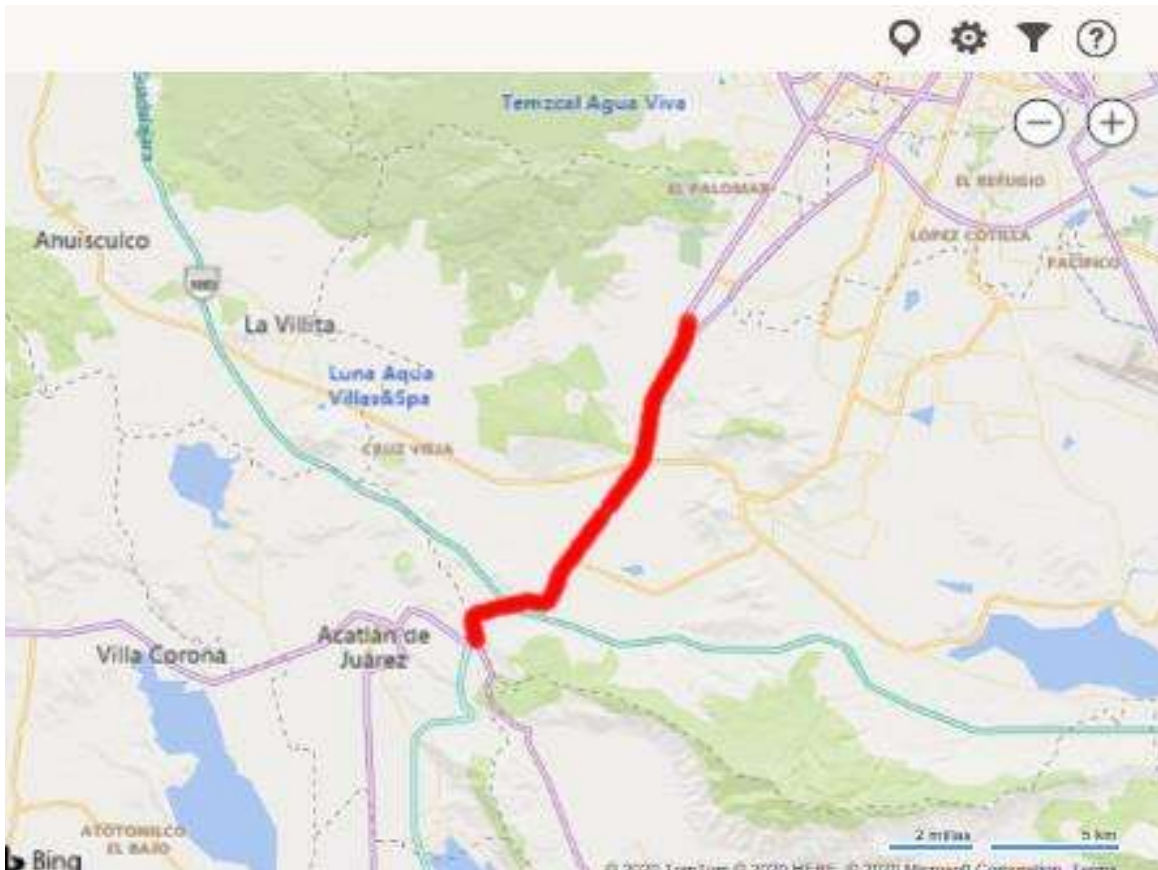
HWD



Coordenadas
Inicio: 20.42437 -103.55327
Fin: 20.54295 -103.47305
Latitud Longitud

Deflexión (mm)
0.77
Característica
máx: 1.36
mín: 0.26

Tipo de superficie
Concreto asfáltico



Anexo 1.1 Hoja “resumen”



"OBTENCIÓN DE ELEMENTOS PARA EL PRONÓSTICO DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LOS PAVIMENTOS (DEFLEXIONES) EN DIVERSOS TRAMOS DE LA RED CARRETERA FEDERAL 2020: AUTOPISTAS (RED CONCESIONADA Y RED CAPUFE), CORREDORES CARRETEROS, RED BÁSICA LIBRE Y RED SECUNDARIA"

Información

Clave: JAL015E5-CT1-118.9-136.0
Carretera: Morelia - Guadalajara
Tramo: Lim Edos Mich/Jal - Guadalajara (Cpo. B)
Sentido: S2

			Impacto 1										Impacto 2										Temperatura [°C]		Diferencia entre fuerzas [%]	Esfuerzo promedio [kN]	Coordenadas geográficas			Coordenadas UTM			Incidencias																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
No	Cadenamiento	Tipo de superficie	Esfuerzo 1 [kPa]	Fuerza 1 [kN]	Deflexiones [mm]							Esfuerzo 2 [kPa]	Fuerza 2 [kN]	Deflexiones [mm]							Superficie	Aire	Latitud	Longitud			Elevación	X	Y	Zona																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
					S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7			S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												</



"OBTENCIÓN DE ELEMENTOS PARA EL PRONÓSTICO DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LOS PAVIMENTOS (DEFLEXIONES) EN DIVERSOS TRAMOS DE LA RED CARRETERA FEDERAL 2020: AUTOPISTAS (RED CONCESIONADA Y RED CAPUFE), CORREDORES CARRETEROS, RED BÁSICA LIBRE Y RED SECUNDARIA"

Información

Clave: JAL015E5-CTI-118.9-136.0

Carretera: Morelia - Guadalajara

Tramo: Lim Edos Mich/Jal - Guadalajara (Cpo. B)

Sentido: 52

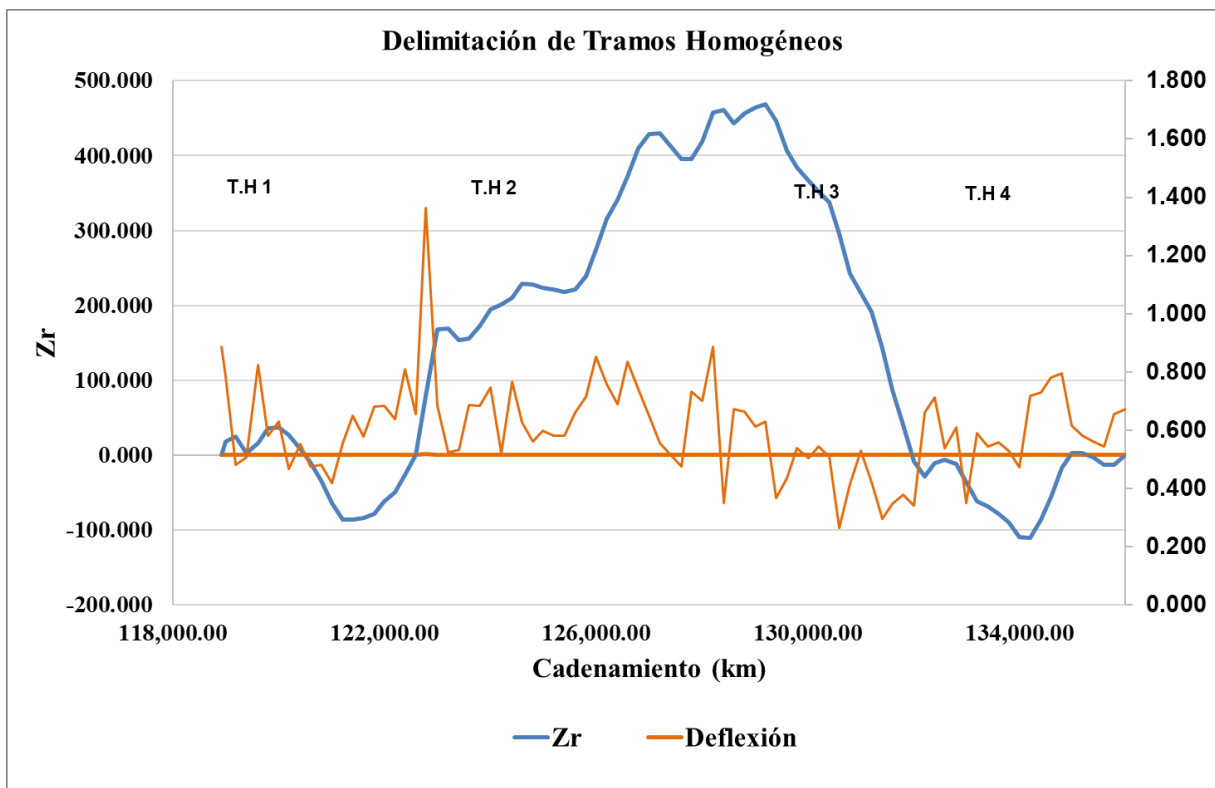
No	Cadenamiento	Tipo de superficie	Espesores de capa [cm]					Tipo de material					Módulos de elasticidad [Mpa]				
			Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 5	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 5	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 5
1	118+920	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			2,424	208	57		
2	118+999	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			2,835	231	52		
3	119+187	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			2,127	526	122		
4	119+391	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			7,131	262	87		
5	119+599	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			2,746	267	35		
6	119+798	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			6,247	274	53		
7	119+992	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			4,659	399	50		
8	120+189	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			6,525	459	76		
9	120+402	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			6,310	276	45		
10	120+598	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			4,642	511	93		
11	120+799	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			3,035	529	90		
12	120+998	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			5,970	463	104		
13	121+198	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			2,006	449	126		
14	121+394	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			4,634	305	38		
15	121+598	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			5,887	326	63		
16	121+798	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			1,526	353	56		
17	121+995	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			2,378	327	58		
18	122+194	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			3,850	304	59		
19	122+384	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			2,992	187	60		
20	122+584	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			4,124	314	63		
21	122+778	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			1,449	124	33		
22	122+988	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			3,225	293	45		
23	123+197	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			4,953	379	47		
24	123+400	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			2,463	428	72		
25	123+598	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			3,150	270	41		
26	123+798	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			4,982	149	52		
27	123+992	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			2,876	228	64		
28	124+196	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			7,162	295	71		
29	124+400	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			4,260	111	71		
30	124+599	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			2,280	415	87		
31	124+797	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			3,566	337	55		
32	124+995	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			3,859	379	63		
33	125+193	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			3,584	448	90		
34	125+399	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			4,491	470	68		
35	125+600	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			2,218	700	61		
36	125+800	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			4,843	324	55		
37	125+995	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			6,989	144	50		
38	126+197	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			4,062	233	73		
39	126+397	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			5,654	252	70		
40	126+593	Flexible	11.9	23.9	36.3			Carpeta asfáltica	Base granular	Subrasante			3,263	302	54		

Anexo 1.3 Resultado de estratigrafía del pavimento dados en la hoja "Retrocálculo datos" de los primeros 40 puntos de prueba

Anexo 2. Zonas homogéneas ejemplo del tramo 1 Morelia - Guadalajara

Km I	Km F.	Distancia	Deflexión	Dist Acum	Promedio	Área del intervalo	Área acumulativa	Zr
	118,920.00	0	0.887	0	0.887	0.000	0.000	0.000
118,920.00	118,999.00	79.002	0.783	79.002	0.835	65.965	65.965	18.512
118,999.00	119,187.00	187.996	0.481	266.998291	0.632	118.835	184.800	24.425
119,187.00	119,391.00	204.002	0.507	471.0006714	0.494	100.779	285.578	2.668
119,391.00	119,599.00	208.000	0.823	679.0008545	0.665	138.336	423.915	16.067
119,599.00	119,798.00	198.997	0.582	877.9983521	0.702	139.763	563.678	36.301
119,798.00	119,992.00	194.000	0.631	1071.998596	0.606	117.609	681.287	37.382
119,992.00	120,189.00	197.006	0.467	1269.004822	0.549	108.149	789.436	27.198
120,189.00	120,402.00	212.997	0.553	1482.002258	0.510	108.630	898.065	7.889
120,402.00	120,598.00	195.999	0.476	1678.001404	0.514	100.827	998.892	-9.013
120,598.00	120,799.00	201.004	0.481	1879.005432	0.478	96.169	1095.061	-33.578
120,799.00	120,998.00	198.997	0.417	2078.00293	0.449	89.374	1184.435	-63.734
120,998.00	121,198.00	199.997	0.554	2277.999878	0.486	97.172	1281.607	-86.692
121,198.00	121,394.00	195.999	0.649	2473.999023	0.601	117.882	1399.489	-86.538
121,394.00	121,598.00	204.002	0.579	2678.001404	0.614	125.197	1524.686	-83.876
121,598.00	121,798.00	199.997	0.680	2877.998352	0.630	125.924	1650.610	-78.083
121,798.00	121,995.00	197.006	0.684	3075.004578	0.682	134.354	1784.964	-62.062
121,995.00	122,194.00	198.997	0.639	3274.002075	0.661	131.573	1916.537	-50.019
122,194.00	122,384.00	190.002	0.811	3464.004517	0.725	137.685	2054.221	-26.461
122,384.00	122,584.00	199.997	0.656	3664.001465	0.733	146.666	2200.887	0.076
122,584.00	122,778.00	194.000	1.362	3858.001709	1.009	195.734	2396.621	79.282
122,778.00	122,988.00	209.999	0.684	4068.000793	1.023	214.809	2611.430	167.953
122,988.00	123,197.00	209.000	0.523	4277.000427	0.604	126.142	2737.572	168.558
123,197.00	123,400.00	203.003	0.532	4480.003357	0.527	107.053	2844.624	153.675
123,400.00	123,598.00	197.998	0.686	4678.001404	0.609	120.536	2965.160	155.282
123,598.00	123,798.00	199.997	0.684	4877.998352	0.685	137.014	3102.175	172.166
123,798.00	123,992.00	194.000	0.745	5071.998596	0.715	138.687	3240.862	194.326
123,992.00	124,196.00	204.002	0.522	5276.000977	0.634	129.258	3370.120	201.048
124,196.00	124,400.00	204.002	0.768	5480.003357	0.645	131.531	3501.651	210.044
124,400.00	124,599.00	198.997	0.627	5679.000854	0.697	138.748	3640.400	229.263
124,599.00	124,797.00	197.998	0.562	5876.998901	0.594	117.636	3758.036	227.970
124,797.00	124,995.00	198.006	0.599	6075.004578	0.580	114.880	3872.916	223.917
124,995.00	125,193.00	197.998	0.580	6273.002625	0.589	116.711	3989.627	221.698
125,193.00	125,399.00	206.001	0.581	6479.003906	0.581	119.607	4109.234	217.569
125,399.00	125,600.00	200.996	0.662	6680.00305	0.622	124.943	4234.177	221.782
125,600.00	125,800.00	200.005	0.716	6880.004883	0.689	137.764	4371.941	239.412
125,800.00	125,995.00	195.000	0.851	7075.004578	0.783	152.752	4524.693	275.035
125,995.00	126,197.00	201.996	0.757	7277.000427	0.804	162.423	4687.116	316.128
126,197.00	126,397.00	200.005	0.691	7477.005005	0.724	144.769	4831.885	340.763
126,397.00	126,593.00	195.999	0.835	7673.00415	0.763	149.527	4981.412	372.562
126,593.00	126,793.00	199.997	0.740	7873.001099	0.788	157.538	5138.950	409.970
126,793.00	126,996.00	203.003	0.651	8076.004028	0.695	141.188	5280.139	429.223
126,996.00	127,202.00	206.001	0.555	8282.00531	0.603	124.216	5404.355	429.703
127,202.00	127,601.00	398.994	0.474	8680.999756	0.515	205.348	5609.703	395.392
127,601.00	127,800.00	199.005	0.731	8880.004883	0.603	119.904	5729.607	395.762
127,800.00	127,997.00	196.999	0.702	9077.003479	0.716	141.094	5870.701	418.527
127,997.00	128,199.01	202.003	0.885	9279.006958	0.793	160.235	6030.936	457.427
128,199.01	128,403.00	203.995	0.350	9483.001709	0.617	125.909	6156.845	460.805
128,403.00	128,599.00	195.999	0.673	9679.000854	0.511	100.251	6257.096	443.327
128,599.00	128,800.99	201.996	0.664	9880.996704	0.669	135.041	6392.137	457.038
128,800.99	128,998.99	197.998	0.614	10078.99475	0.639	126.437	6518.574	464.546
128,998.99	129,188.00	189.011	0.628	10268.00537	0.621	117.348	6635.922	468.363
129,188.00	129,395.00	207.001	0.366	10475.0061	0.497	102.885	6738.807	446.911
129,395.00	129,599.00	203.995	0.435	10679.00085	0.401	81.705	6820.511	406.085
129,599.00	129,791.00	192.001	0.537	10871.0022	0.486	93.345	6913.857	384.103
129,791.00	130,002.00	210.999	0.503	11082.00073	0.520	109.761	7023.618	367.126
130,002.00	130,199.01	197.006	0.544	11279.00696	0.524	103.189	7126.807	351.982
130,199.01	130,396.00	196.991	0.511	11475.99792	0.528	103.952	7230.760	337.611
130,396.00	130,595.00	199.005	0.264	11675.00305	0.388	77.158	7307.918	295.235
130,595.00	130,799.00	203.995	0.416	11878.9978	0.340	69.446	7377.364	242.150
130,799.00	130,998.99	199.997	0.528	12078.99475	0.472	94.489	7471.853	216.509
130,998.99	131,201.00	202.011	0.420	12281.00586	0.474	95.787	7567.640	190.957
131,201.00	131,399.00	197.998	0.295	12479.00391	0.358	70.815	7638.455	142.843
131,399.00	131,599.00	199.997	0.347	12679.00085	0.321	64.232	7702.687	86.945
131,599.00	131,796.01	197.006	0.379	12876.00708	0.363	71.506	7774.193	40.117
131,796.01	131,998.00	201.996	0.342	13078.00293	0.361	72.823	7847.015	-8.391
131,998.00	132,199.01	201.004	0.662	13279.00696	0.502	100.914	7947.929	-28.211
132,199.01	132,401.99	202.988	0.712	13481.99463	0.687	139.474	8087.404	-10.663
132,401.99	132,590.00	188.004	0.539	13669.99817	0.626	117.648	8205.051	-5.941
132,590.00	132,798.00	208.008	0.609	13878.00598	0.574	119.459	8324.510	-11.424
132,798.00	132,996.99	198.990	0.349	14076.99585	0.479	95.302	8419.813	-35.646
132,996.99	133,196.00	199.005	0.591	14276.00098	0.470	93.478	8513.291	-61.702
133,196.00	133,399.00	203.003	0.544	14479.00391	0.567	115.178	8628.469	-68.460
133,399.00	133,597.00	197.998	0.558	14677.00195	0.551	109.084	8737.553	-78.305
133,597.00	133,798.00	201.004	0.531	14878.00598	0.544	109.422	8846.975	-89.617
133,798.00	133,995.00	196.991	0.472	15074.99695	0.501	98.774	8945.749	-109.167
133,995.00	134,196.00	201.004	0.717	15276.00098	0.594	119.472	9065.221	-110.430
134,196.00	134,397.00	201.004	0.730	15477.005	0.723	145.377	9210.598	-85.787
134,397.00	134,592.00	194.992	0.780	15671.99707	0.755	147.188	9357.786	-55.723
134,592.00	134,800.00	208.008	0.795	15880.00488	0.788	163.825	9521.611	-16.840
134,800.00	134,988.01	188.004	0.615	16068.00842	0.705	132.601	9654.212	2.836
134,988.01	135,196.00	207.993	0.582	16276.00098	0.599	124.561	9778.773	2.464
135,196.00	135,397.99	201.996	0.562	16477.99683	0.572	115.529	9894.302	-3.337
135,397.99	135,600.01	202.011	0.543	16680.00793	0.552	111.592	10005.894	-13.085
135,600.01	135,787.99	187.988	0.656	16867.99622	0.600	112.699	10118.593	-13.302
135,787.99	136,000.00	212.006	0.671	17080.00183	0.663	140.645	10259.238	0.000
135,787.99						AT =	10259.238	

Anexo 2.1 Hoja de cálculo zonas homogéneas

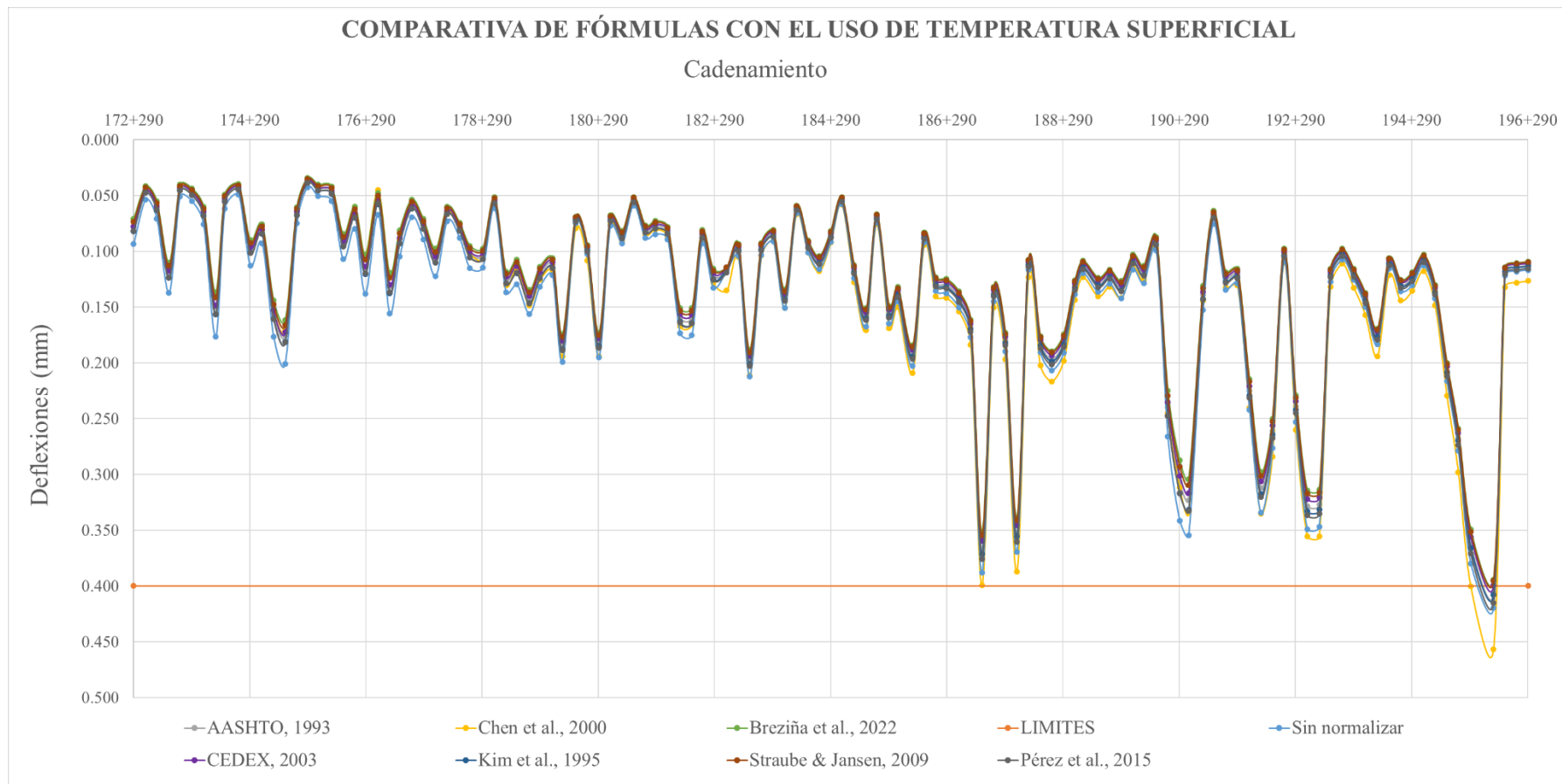


Anexo 2.2 Gráfico delimitación de zonas homogéneas integrando el criterio de deflexión máxima y el valor Zr

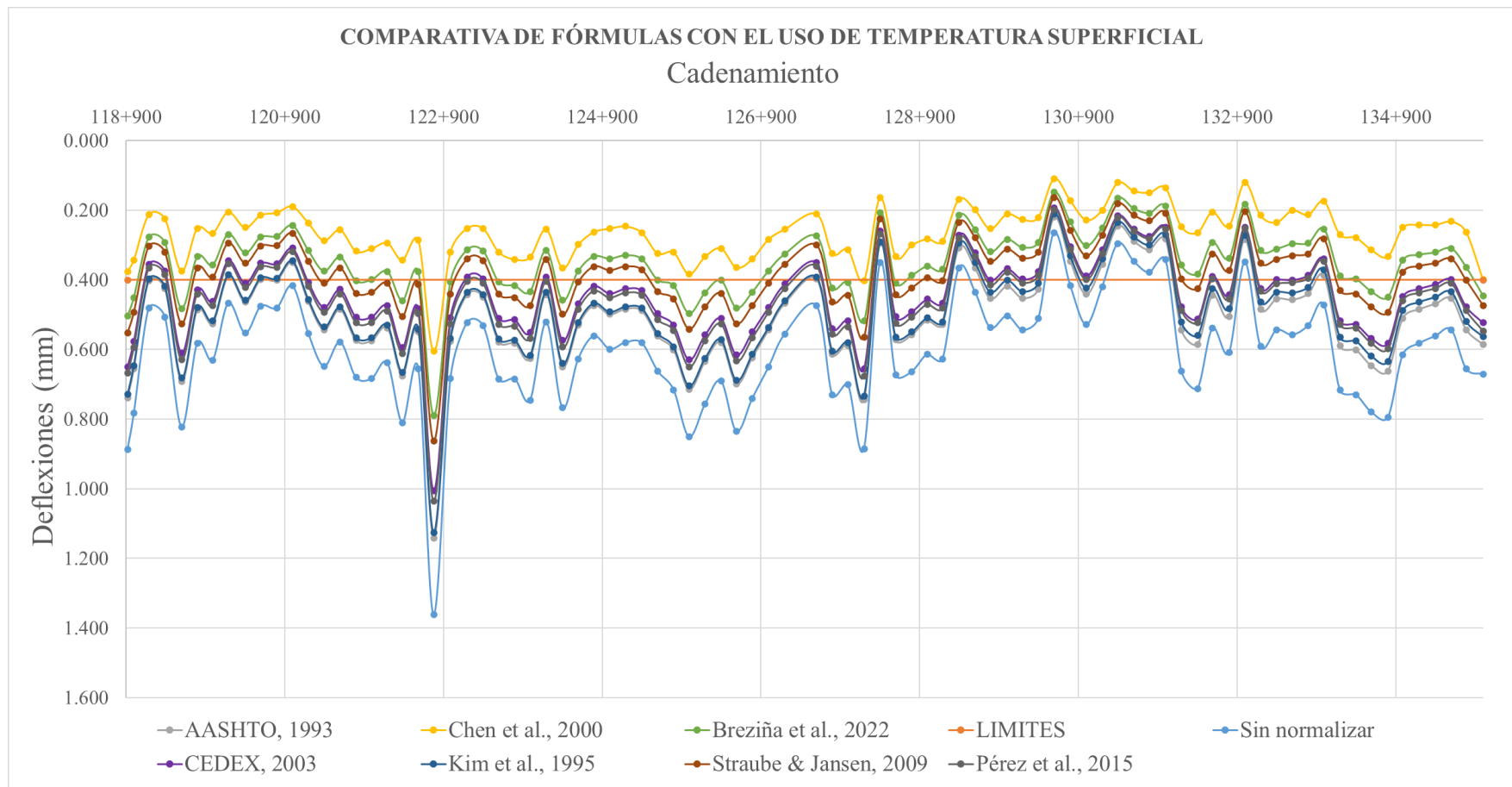
Anexo 3. Comparativa de ecuaciones con temperatura superficial

COMPARATIVA CON EL USO DE TEMPERATURA SUPERFICIAL									
Cadenamiento	Espesor CA	Sin normalizar por temperatura	AASHTO, 1993	Chen et al., 2000	Breziña et al., 2022	CEDEX 2003	Straube & Jansen, 2009	Pérez et al., 2015	Kim et al., 1995
62+001	9.49	0.288	0.233	0.090	0.146	0.288	0.164	0.206	0.245
62+199	9.49	0.277	0.227	0.100	0.148	0.277	0.164	0.202	0.237
62+401	9.49	0.366	0.299	0.125	0.191	0.366	0.214	0.265	0.313
62+603	9.49	0.299	0.246	0.115	0.163	0.299	0.180	0.221	0.257
62+800	9.49	0.228	0.187	0.083	0.122	0.228	0.136	0.167	0.196
63+001	9.49	0.331	0.270	0.114	0.173	0.331	0.194	0.240	0.283
63+198	9.49	0.367	0.296	0.114	0.185	0.367	0.209	0.262	0.312
63+399	9.49	0.306	0.247	0.095	0.155	0.306	0.174	0.218	0.260
63+599	9.49	0.278	0.225	0.088	0.141	0.278	0.159	0.199	0.236
63+802	9.49	0.175	0.142	0.058	0.090	0.175	0.101	0.126	0.150
64+000	9.49	0.234	0.190	0.075	0.119	0.234	0.134	0.168	0.200
64+200	9.49	0.373	0.303	0.125	0.193	0.373	0.217	0.269	0.319
64+398	9.49	0.284	0.229	0.087	0.143	0.284	0.161	0.202	0.242
64+601	9.49	0.186	0.151	0.061	0.096	0.186	0.107	0.134	0.159
64+807	9.49	0.361	0.291	0.112	0.182	0.361	0.205	0.257	0.307
64+995	9.49	0.279	0.225	0.086	0.141	0.279	0.159	0.199	0.237
65+200	9.49	0.400	0.321	0.112	0.195	0.400	0.222	0.281	0.339
65+396	9.49	0.339	0.269	0.085	0.160	0.339	0.183	0.234	0.285
65+602	9.49	0.229	0.180	0.049	0.103	0.229	0.120	0.156	0.191
65+799	9.49	0.336	0.263	0.069	0.150	0.336	0.174	0.227	0.280
65+998	9.49	0.303	0.239	0.069	0.139	0.303	0.161	0.207	0.254
66+199	9.49	0.225	0.178	0.054	0.105	0.225	0.121	0.155	0.189
66+400	9.49	0.274	0.217	0.065	0.127	0.274	0.146	0.188	0.230
66+599	9.49	0.325	0.258	0.079	0.152	0.325	0.175	0.224	0.273
66+802	9.49	0.236	0.190	0.068	0.116	0.236	0.132	0.167	0.200
67+000	9.49	0.439	0.348	0.106	0.205	0.439	0.236	0.303	0.369
67+198	9.49	0.495	0.390	0.108	0.224	0.495	0.260	0.337	0.414
67+399	9.49	0.209	0.167	0.056	0.101	0.209	0.115	0.146	0.176
67+602	9.49	0.617	0.487	0.143	0.284	0.617	0.328	0.423	0.518
67+801	9.49	0.228	0.181	0.057	0.108	0.228	0.123	0.158	0.192
68+002	9.49	0.249	0.197	0.060	0.116	0.249	0.133	0.171	0.209
68+197	9.49	0.295	0.233	0.067	0.135	0.295	0.156	0.202	0.247
68+401	9.49	0.302	0.241	0.083	0.146	0.302	0.167	0.212	0.255
68+602	9.49	0.376	0.296	0.081	0.170	0.376	0.197	0.256	0.315
68+801	9.49	0.207	0.160	0.035	0.088	0.207	0.104	0.137	0.171
69+001	9.49	0.457	0.354	0.078	0.195	0.457	0.229	0.303	0.379
69+200	9.49	0.485	0.380	0.099	0.216	0.485	0.251	0.328	0.405
69+401	9.49	0.353	0.275	0.068	0.155	0.353	0.181	0.237	0.294
69+598	9.49	0.212	0.166	0.041	0.093	0.212	0.109	0.143	0.177
69+800	9.49	0.373	0.289	0.064	0.159	0.373	0.187	0.248	0.309
70+000	9.49	0.518	0.402	0.088	0.221	0.518	0.260	0.344	0.430
70+201	9.49	0.623	0.492	0.146	0.288	0.623	0.332	0.428	0.523
70+397	9.49	0.574	0.446	0.100	0.246	0.574	0.289	0.382	0.476
70+600	9.49	0.440	0.344	0.087	0.194	0.440	0.226	0.296	0.366
70+799	9.49	0.443	0.343	0.074	0.188	0.443	0.221	0.293	0.367
70+998	9.49	0.467	0.360	0.069	0.194	0.467	0.230	0.307	0.386
71+200	9.49	0.586	0.454	0.097	0.249	0.586	0.293	0.388	0.486
71+399	9.49	0.509	0.395	0.086	0.217	0.509	0.255	0.338	0.422
71+601	9.49	0.411	0.316	0.056	0.168	0.411	0.200	0.268	0.339
71+801	9.49	0.418	0.324	0.071	0.178	0.418	0.210	0.277	0.347
72+002	9.49	0.422	0.327	0.070	0.179	0.422	0.211	0.280	0.350

Anexo 3.1 Tabla de resultados de la comparativa por 10 kilómetros del tramo ejemplificado Campeche – Mérida.
Carretera federal 180.



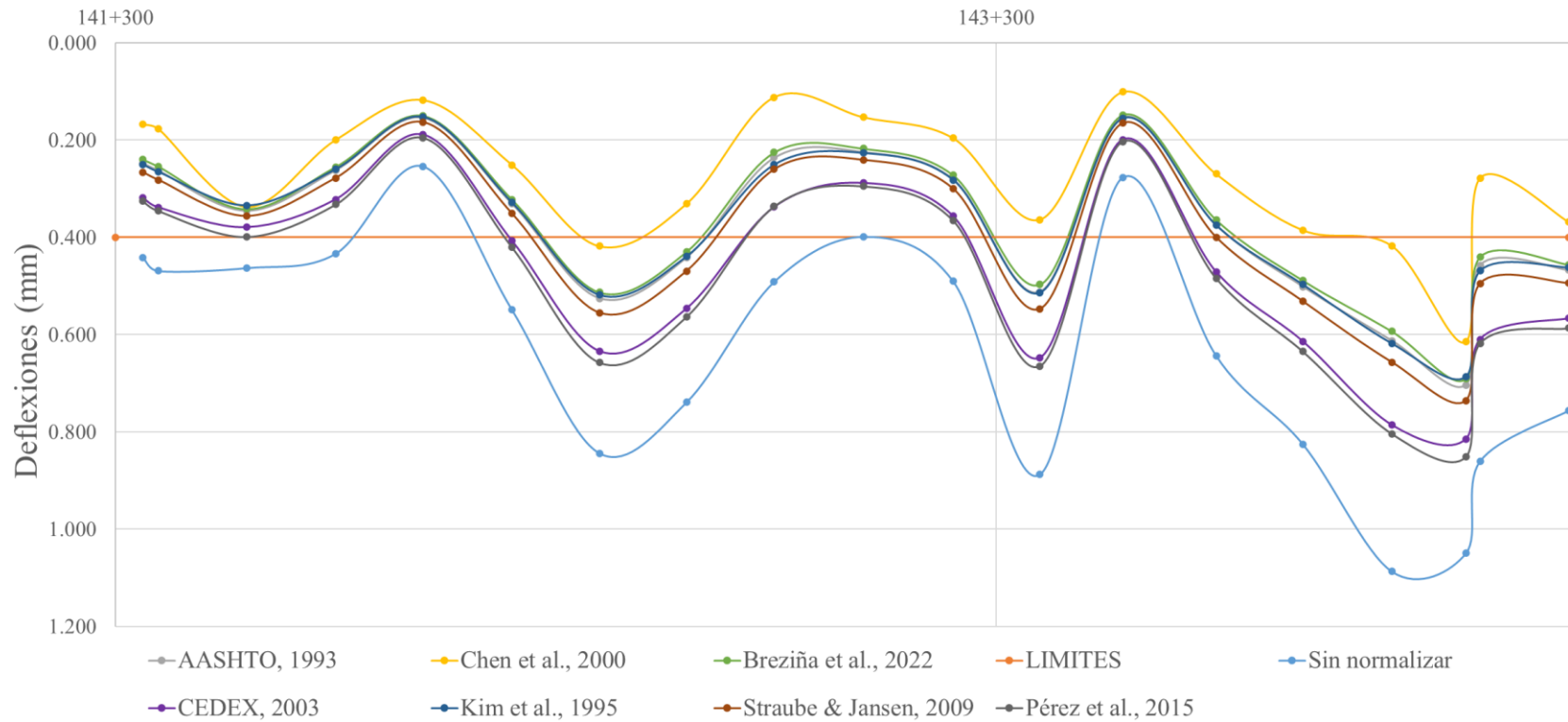
Anexo 3.2 Gráfico de comparativa de ecuaciones tramo carretera federal 57 en el estado de San Luís Potosí



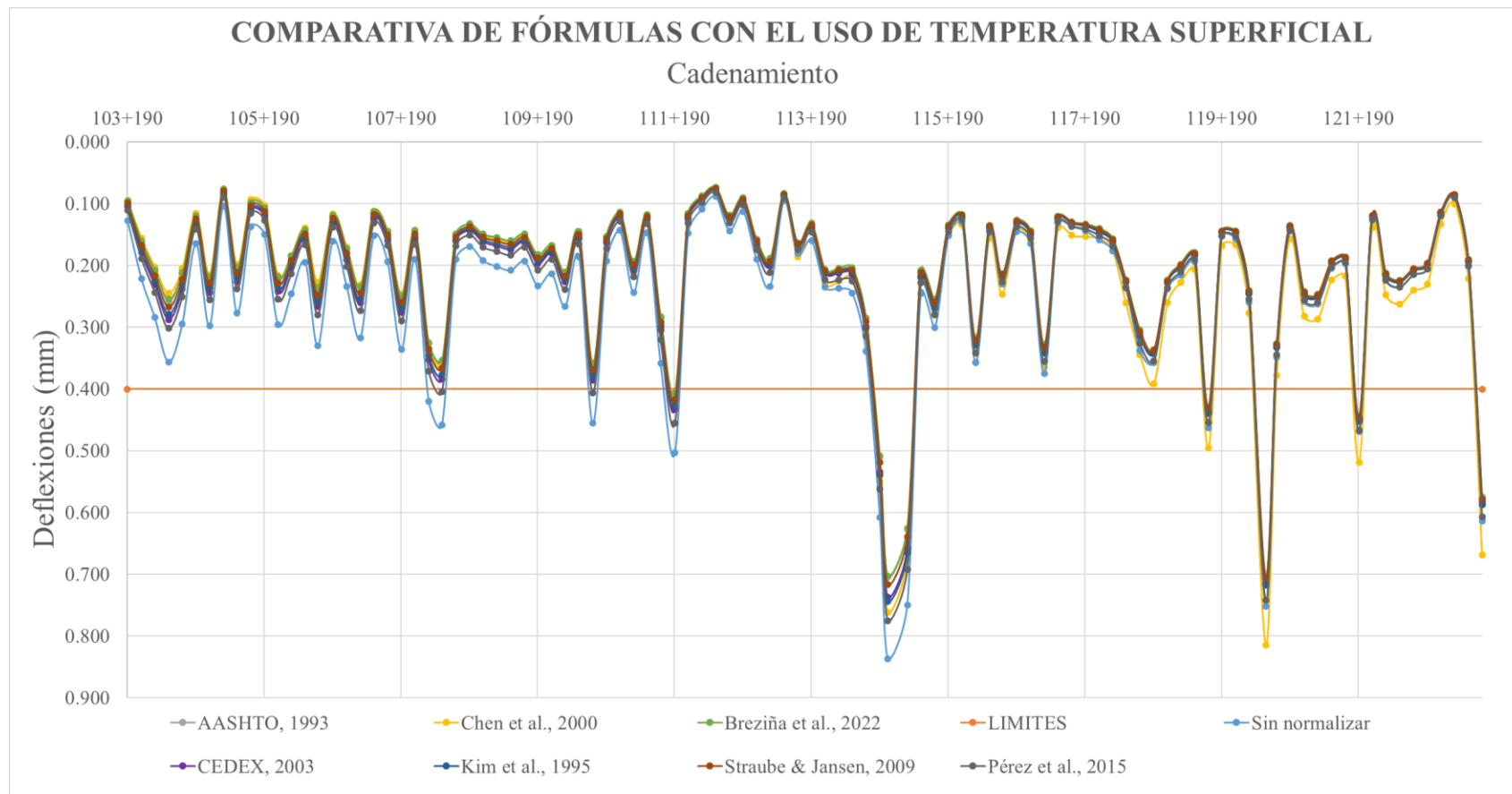
Anexo 3.3 Gráfico de comparativa de ecuaciones tramo carretera federal 15 en el estado de Jalisco

COMPARATIVA DE FÓRMULAS CON EL USO DE TEMPERATURA SUPERFICIAL

Cadenamiento

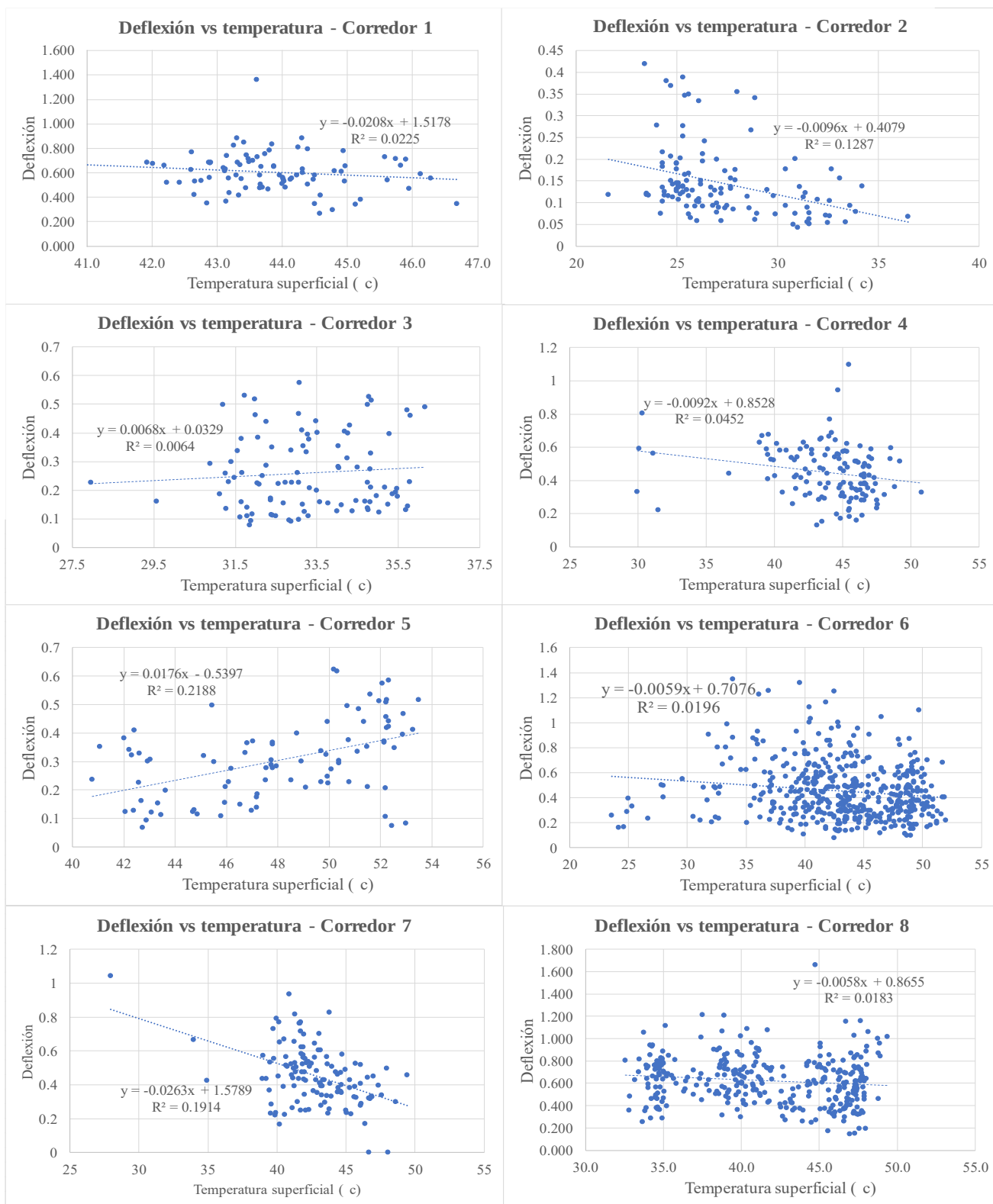


Anexo 3.4 Gráfico de comparativa de ecuaciones tramo carretera federal 15 en el estado de Michoacán

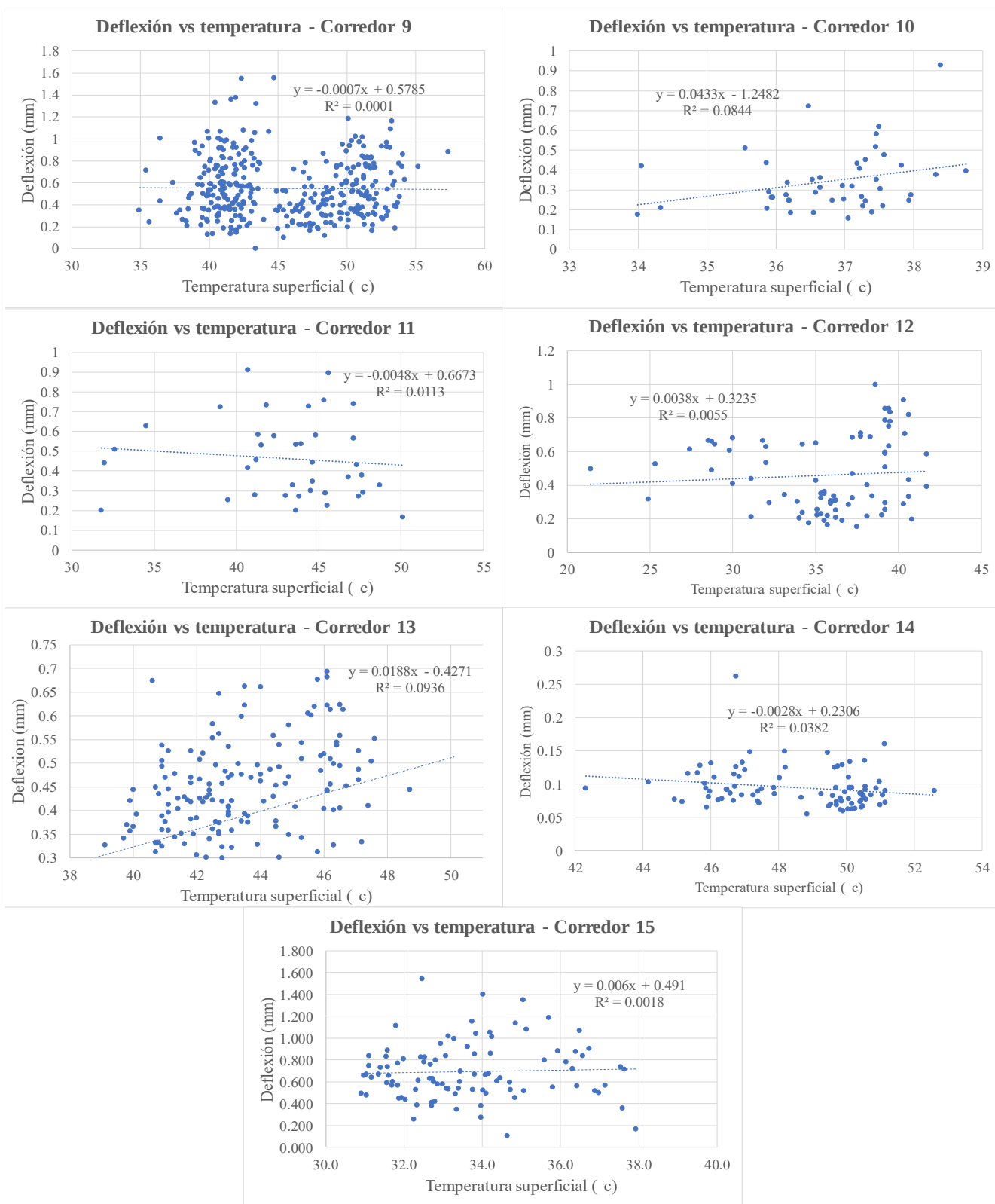


Anexo 3.5 Gráfico de comparativa de ecuaciones tramo carretera federal 45 en el estado de Aguascalientes

Anexo 4. Relación de temperatura superficial vs deflexión máxima



Anexo 4.1 Gráficos de relación deflexión del sensor 1 vs temperatura superficial de los corredores carreteros desde el 1 al 8



Anexo 4.2 Gráficos de relación deflexión del sensor 1 vs temperatura superficial de los corredores carreteros desde el 9 al 15

Anexo 5. Análisis del comportamiento de temperatura del pavimento

Día/Mes/Año Hora del día	z = 0.01m	z = 0.02m	z = 0.03m	z = 0.04m	z = 0.05m	z = 0.06m	z = 0.07m	z = 0.08m	z = 0.09m	z = 0.1m	z = 0.11m
1/1/2020-0:00	17.61	17.52	17.42	17.33	17.24	17.15	17.05	16.96	16.87	16.78	16.68
1/1/2020-0:00	17.23	17.21	17.18	17.14	17.09	17.03	16.96	16.89	16.82	16.75	16.67
1/1/2020-1:00	16.23	16.38	16.49	16.56	16.61	16.64	16.64	16.63	16.61	16.58	16.54
1/1/2020-1:00	15.68	15.84	15.98	16.09	16.18	16.24	16.29	16.32	16.34	16.35	16.34
1/1/2020-2:00	15.28	15.45	15.59	15.71	15.82	15.9	15.98	16.03	16.08	16.11	16.13
1/1/2020-2:00	14.94	15.11	15.25	15.39	15.5	15.6	15.69	15.76	15.83	15.87	15.91
1/1/2020-3:00	14.65	14.82	14.97	15.1	15.23	15.34	15.43	15.52	15.59	15.65	15.7
1/1/2020-3:00	14.39	14.55	14.71	14.85	14.98	15.09	15.2	15.29	15.37	15.44	15.51
1/1/2020-4:00	14.16	14.32	14.48	14.62	14.75	14.87	14.98	15.08	15.17	15.25	15.32
1/1/2020-4:00	13.94	14.1	14.26	14.4	14.54	14.66	14.78	14.88	14.98	15.06	15.14
1/1/2020-5:00	13.73	13.9	14.06	14.2	14.34	14.47	14.58	14.69	14.79	14.88	14.97
1/1/2020-5:00	13.52	13.69	13.85	14	14.14	14.28	14.4	14.51	14.62	14.71	14.8
1/1/2020-6:00	13.33	13.5	13.67	13.82	13.96	14.09	14.22	14.34	14.45	14.55	14.64
1/1/2020-6:00	13.15	13.32	13.49	13.64	13.79	13.92	14.05	14.17	14.28	14.39	14.48
1/1/2020-7:00	12.96	13.14	13.3	13.46	13.61	13.75	13.88	14.01	14.12	14.23	14.33
1/1/2020-7:00	12.79	12.96	13.13	13.29	13.44	13.58	13.72	13.85	13.96	14.08	14.18
1/1/2020-8:00	12.61	12.79	12.96	13.12	13.28	13.42	13.56	13.69	13.81	13.93	14.04
1/1/2020-8:00	12.45	12.63	12.8	12.96	13.12	13.26	13.4	13.54	13.66	13.78	13.89
1/1/2020-9:00	12.3	12.48	12.65	12.81	12.97	13.12	13.26	13.39	13.52	13.64	13.76
1/1/2020-9:00	12.15	12.33	12.5	12.67	12.82	12.97	13.12	13.25	13.38	13.5	13.62
1/1/2020-10:00	12.02	12.19	12.36	12.53	12.68	12.83	12.98	13.12	13.25	13.37	13.49
1/1/2020-10:00	11.89	12.06	12.23	12.4	12.55	12.7	12.85	12.99	13.12	13.24	13.36
1/1/2020-11:00	11.77	11.94	12.11	12.27	12.43	12.58	12.72	12.86	13	13.12	13.24
1/1/2020-11:00	11.65	11.82	11.99	12.15	12.31	12.46	12.6	12.74	12.88	13	13.13
1/1/2020-12:00	11.5	11.68	11.85	12.02	12.18	12.33	12.48	12.62	12.76	12.89	13.01
1/1/2020-12:00	11.34	11.53	11.71	11.88	12.04	12.2	12.35	12.49	12.63	12.76	12.89
1/1/2020-13:00	11.21	11.4	11.58	11.75	11.91	12.07	12.22	12.37	12.51	12.64	12.77
1/1/2020-13:00	11.07	11.26	11.44	11.61	11.78	11.94	12.1	12.24	12.39	12.52	12.65
1/1/2020-14:00	11.29	11.4	11.53	11.66	11.8	11.93	12.06	12.19	12.32	12.45	12.57
1/1/2020-14:00	12.53	12.41	12.34	12.31	12.31	12.33	12.37	12.42	12.49	12.57	12.64
1/1/2020-15:00	14.64	14.21	13.87	13.6	13.39	13.23	13.12	13.04	12.99	12.97	12.96
1/1/2020-15:00	17.22	16.49	15.88	15.36	14.93	14.56	14.26	14.02	13.82	13.67	13.54
1/1/2020-16:00	19.95	18.98	18.13	17.39	16.74	16.18	15.69	15.28	14.92	14.62	14.36
1/1/2020-16:00	22.7	21.53	20.48	19.54	18.71	17.97	17.31	16.73	16.22	15.77	15.38
1/1/2020-17:00	25.15	23.86	22.68	21.61	20.64	19.76	18.96	18.25	17.6	17.02	16.5
1/1/2020-17:00	27.41	26.03	24.76	23.58	22.5	21.51	20.6	19.77	19.02	18.32	17.7
1/1/2020-18:00	29.27	27.87	26.56	25.33	24.19	23.13	22.14	21.23	20.39	19.61	18.89
1/1/2020-18:00	30.86	29.46	28.13	26.88	25.7	24.59	23.55	22.58	21.68	20.83	20.05
1/1/2020-19:00	32.01	30.66	29.36	28.13	26.95	25.84	24.78	23.79	22.84	21.96	21.13
1/1/2020-19:00	32.78	31.51	30.28	29.09	27.95	26.85	25.8	24.8	23.85	22.95	22.1
1/1/2020-20:00	33.15	31.99	30.85	29.74	28.66	27.61	26.6	25.62	24.69	23.79	22.93
1/1/2020-20:00	33.2	32.16	31.13	30.11	29.1	28.12	27.16	26.23	25.33	24.46	23.62
1/1/2020-21:00	32.86	31.97	31.07	30.16	29.26	28.37	27.49	26.62	25.78	24.95	24.15
1/1/2020-21:00	32.15	31.43	30.68	29.92	29.14	28.35	27.57	26.79	26.01	25.25	24.5
1/1/2020-22:00	31.1	30.56	29.98	29.37	28.73	28.07	27.4	26.72	26.03	25.35	24.67
1/1/2020-22:00	29.76	29.41	29	28.55	28.06	27.54	26.99	26.42	25.84	25.25	24.66
1/1/2020-23:00	28.1	27.95	27.73	27.46	27.13	26.76	26.35	25.91	25.44	24.96	24.46
1/1/2020-23:00	26.16	26.22	26.2	26.11	25.95	25.74	25.48	25.18	24.84	24.47	24.08
1/2/2020-0:00	24.1	24.35	24.51	24.59	24.6	24.54	24.43	24.26	24.06	23.81	23.54
1/2/2020-0:00	21.82	22.27	22.62	22.88	23.05	23.16	23.2	23.18	23.1	22.99	22.83
1/2/2020-1:00	19.98	20.5	20.94	21.3	21.59	21.81	21.96	22.05	22.1	22.09	22.04
1/2/2020-1:00	18.86	19.34	19.76	20.13	20.45	20.7	20.91	21.07	21.18	21.24	21.27
1/2/2020-2:00	18	18.45	18.85	19.22	19.53	19.81	20.04	20.23	20.37	20.48	20.56
1/2/2020-2:00	17.31	17.73	18.11	18.46	18.78	19.06	19.3	19.5	19.68	19.82	19.92
1/2/2020-3:00	16.74	17.13	17.5	17.84	18.14	18.42	18.67	18.88	19.07	19.23	19.36
1/2/2020-3:00	16.28	16.65	16.99	17.31	17.61	17.88	18.13	18.35	18.54	18.71	18.85
1/2/2020-4:00	15.86	16.21	16.54	16.85	17.14	17.41	17.65	17.87	18.07	18.25	18.4

Anexo 5.1 Resultados del programa TEMPS representando la temperatura del pavimento a diferente profundidad por 1 día

Date-Time	Depth	z = 0.01m	z = 0.06m	z = 0.11m	z = 0.24m	z = 0.35m	z = 0.54m	z = 0.72m
12:00:00 a. m.		17.61	17.15	16.68	15.49	14.48	12.73	11.07
12:30:00 a. m.		17.23	17.03	16.67	15.49	14.48	12.73	11.27
01:00:00 a. m.		16.23	16.64	16.54	15.49	14.48	12.74	11.39
01:30:00 a. m.		15.68	16.24	16.34	15.48	14.48	12.75	11.47
02:00:00 a. m.		15.28	15.9	16.13	15.46	14.48	12.76	11.55
02:30:00 a. m.		14.94	15.6	15.91	15.43	14.47	12.77	11.61
03:00:00 a. m.		14.65	15.34	15.7	15.4	14.47	12.78	11.67
03:30:00 a. m.		14.39	15.09	15.51	15.35	14.46	12.8	11.72
04:00:00 a. m.		14.16	14.87	15.32	15.29	14.45	12.82	11.77
04:30:00 a. m.		13.94	14.66	15.14	15.23	14.44	12.84	11.81
05:00:00 a. m.		13.73	14.47	14.97	15.17	14.43	12.86	11.86
05:30:00 a. m.		13.52	14.28	14.8	15.1	14.41	12.88	11.9
06:00:00 a. m.		13.33	14.09	14.64	15.03	14.39	12.9	11.94
06:30:00 a. m.		13.15	13.92	14.48	14.95	14.37	12.91	11.97
07:00:00 a. m.		12.96	13.75	14.33	14.88	14.35	12.93	12.01
07:30:00 a. m.		12.79	13.58	14.18	14.8	14.32	12.95	12.04
08:00:00 a. m.		12.61	13.42	14.04	14.72	14.29	12.97	12.08
08:30:00 a. m.		12.45	13.26	13.89	14.64	14.26	12.98	12.11
09:00:00 a. m.		12.3	13.12	13.76	14.56	14.23	13	12.14
09:30:00 a. m.		12.15	12.97	13.62	14.48	14.19	13.01	12.17
10:00:00 a. m.		12.02	12.83	13.49	14.4	14.16	13.02	12.19
10:30:00 a. m.		11.89	12.7	13.36	14.32	14.12	13.03	12.22
11:00:00 a. m.		11.77	12.58	13.24	14.24	14.09	13.04	12.25
11:30:00 a. m.		11.65	12.46	13.13	14.16	14.05	13.05	12.27
12:00:00 p. m.		11.5	12.33	13.01	14.08	14.01	13.06	12.29
12:30:00 p. m.		11.34	12.2	12.89	14	13.97	13.07	12.32
01:00:00 p. m.		11.21	12.07	12.77	13.92	13.93	13.08	12.34
01:30:00 p. m.		11.07	11.94	12.65	13.84	13.88	13.08	12.36
02:00:00 p. m.		11.29	11.93	12.57	13.77	13.84	13.08	12.38
02:30:00 p. m.		12.53	12.33	12.64	13.69	13.8	13.09	12.39
03:00:00 p. m.		14.64	13.23	12.96	13.63	13.76	13.09	12.41
03:30:00 p. m.		17.22	14.56	13.54	13.6	13.72	13.09	12.43
04:00:00 p. m.		19.95	16.18	14.36	13.6	13.68	13.09	12.44
04:30:00 p. m.		22.7	17.97	15.38	13.65	13.65	13.09	12.45
05:00:00 p. m.		25.15	19.76	16.5	13.75	13.63	13.08	12.47
05:30:00 p. m.		27.41	21.51	17.7	13.9	13.61	13.08	12.48
06:00:00 p. m.		29.27	23.13	18.89	14.11	13.62	13.08	12.49
06:30:00 p. m.		30.86	24.59	20.05	14.37	13.64	13.08	12.5
07:00:00 p. m.		32.01	25.84	21.13	14.67	13.68	13.07	12.5
07:30:00 p. m.		32.78	26.85	22.1	15.01	13.74	13.07	12.51
08:00:00 p. m.		33.15	27.61	22.93	15.37	13.82	13.07	12.52
08:30:00 p. m.		33.2	28.12	23.62	15.75	13.91	13.08	12.52
09:00:00 p. m.		32.86	28.37	24.15	16.13	14.03	13.08	12.53
09:30:00 p. m.		32.15	28.35	24.5	16.5	14.16	13.09	12.53
10:00:00 p. m.		31.1	28.07	24.67	16.85	14.3	13.1	12.54
10:30:00 p. m.		29.76	27.54	24.66	17.19	14.45	13.12	12.55
11:00:00 p. m.		28.1	26.76	24.46	17.48	14.61	13.14	12.55
11:30:00 p. m.		26.16	25.74	24.08	17.74	14.78	13.16	12.56

Anexo 5.2 Tabla de resultados de la gráfica mostrada en la imagen 41

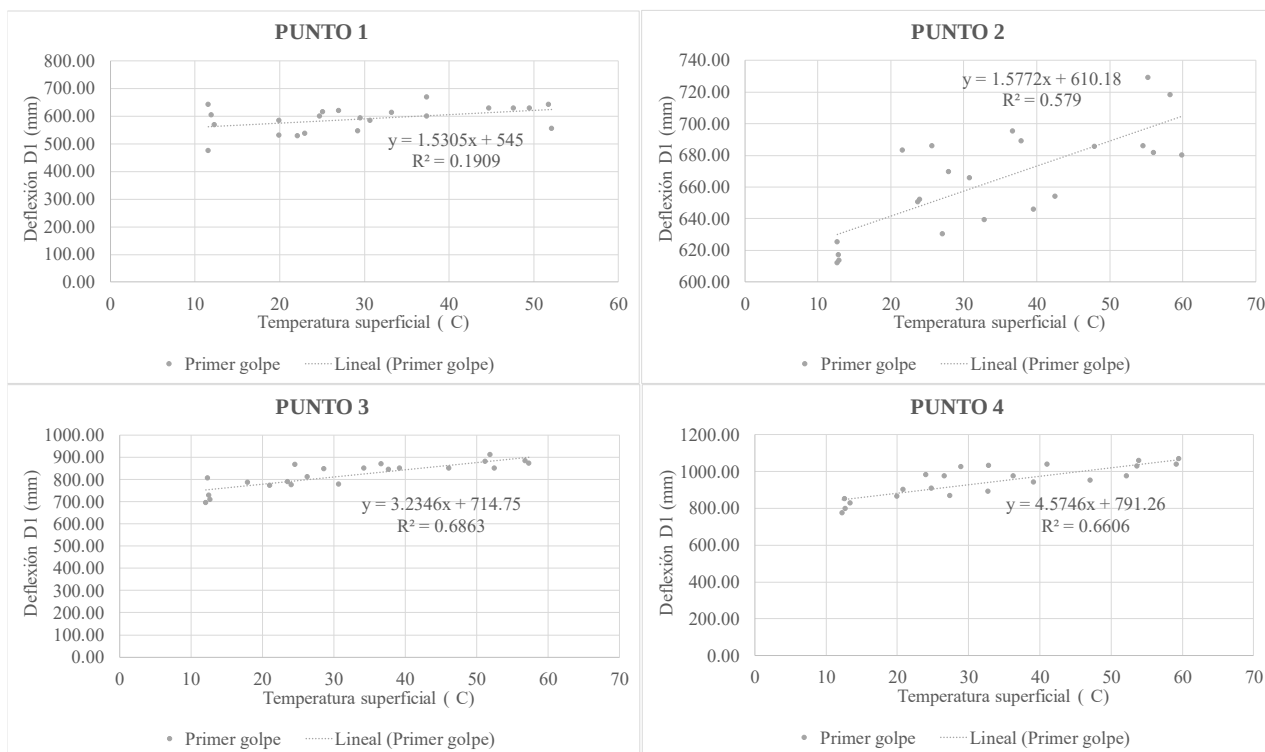
Anexo 6. Comparativa de ecuaciones con temperatura predicción

COMPARATIVA DE FÓRMULAS CON EL USO DE TEMPERATURA DE PREDICCIÓN - Corredor 1											
Cadenamiento	Temperatura superficial	Temperatura de predicción	Espesor CA	Sin normalizar por temperatura	AASHTO, 1993	Chen et al., 2000	Breziña et al., 2022	CEDEX, 2003	Straube & Jansen, 2009	Pérez et al., 2015	Kim et al., 1995
118+920	44.3	40.8	11.9	0.887	0.570	0.474	0.558	0.676	0.600	0.703	0.750
118+999	43.8	40.8	11.9	0.783	0.504	0.419	0.494	0.597	0.530	0.621	0.663
119+187	43.7	40.8	11.9	0.481	0.309	0.257	0.303	0.367	0.325	0.381	0.407
119+391	43.7	40.8	11.9	0.507	0.326	0.271	0.320	0.387	0.343	0.402	0.429
119+599	43.3	40.8	11.9	0.823	0.530	0.440	0.518	0.627	0.557	0.653	0.696
119+798	44.0	40.4	11.9	0.582	0.378	0.319	0.371	0.446	0.397	0.464	0.494
119+992	44.3	40.4	11.9	0.631	0.410	0.346	0.402	0.483	0.431	0.503	0.535
120+189	43.8	40.4	11.9	0.467	0.304	0.256	0.298	0.358	0.319	0.373	0.396
120+402	43.4	40.4	11.9	0.553	0.360	0.303	0.352	0.424	0.378	0.441	0.469
120+598	43.4	40.4	11.9	0.476	0.310	0.261	0.303	0.365	0.325	0.380	0.404
120+799	44.0	40.1	11.9	0.481	0.315	0.267	0.308	0.369	0.330	0.385	0.409
120+998	43.3	40.1	11.9	0.417	0.273	0.232	0.268	0.321	0.287	0.334	0.355
121+198	44.1	40.1	11.9	0.554	0.363	0.308	0.356	0.426	0.381	0.444	0.471
121+394	43.7	40.1	11.9	0.649	0.424	0.360	0.416	0.498	0.445	0.519	0.551
121+598	43.7	40.1	11.9	0.579	0.379	0.321	0.371	0.445	0.397	0.463	0.492
121+798	42.9	40.2	11.9	0.680	0.445	0.377	0.436	0.522	0.467	0.544	0.578
121+995	43.3	40.2	11.9	0.684	0.447	0.379	0.438	0.525	0.469	0.547	0.581
122+194	43.1	40.2	11.9	0.639	0.418	0.354	0.409	0.491	0.438	0.511	0.543
122+384	44.2	40.2	11.9	0.811	0.530	0.450	0.520	0.622	0.556	0.648	0.689
122+584	43.9	40.2	11.9	0.656	0.429	0.364	0.421	0.504	0.450	0.525	0.558
122+778	43.6	39.7	11.9	1.362	0.902	0.776	0.884	1.051	0.944	1.097	1.162
122+988	42.9	39.7	11.9	0.684	0.453	0.390	0.444	0.528	0.474	0.551	0.584
123+197	42.4	39.7	11.9	0.523	0.346	0.298	0.340	0.404	0.363	0.421	0.446
123+400	42.7	39.7	11.9	0.532	0.352	0.303	0.345	0.411	0.369	0.428	0.454
123+598	42.9	39.7	11.9	0.686	0.454	0.391	0.445	0.530	0.476	0.552	0.585
123+798	41.9	39.6	11.9	0.684	0.453	0.391	0.445	0.529	0.475	0.551	0.584
123+992	43.5	39.6	11.9	0.745	0.494	0.426	0.485	0.576	0.517	0.601	0.636
124+196	42.2	39.6	11.9	0.522	0.346	0.298	0.339	0.403	0.362	0.420	0.445
124+400	42.6	39.6	11.9	0.768	0.509	0.438	0.499	0.593	0.533	0.619	0.655
124+599	42.6	39.6	11.9	0.627	0.415	0.358	0.407	0.484	0.435	0.505	0.535
124+797	42.9	39.4	11.9	0.562	0.374	0.324	0.367	0.435	0.392	0.454	0.480
124+995	44.3	39.4	11.9	0.599	0.399	0.346	0.392	0.464	0.418	0.484	0.512
125+193	44.2	39.4	11.9	0.580	0.386	0.335	0.379	0.449	0.404	0.469	0.496
125+399	43.3	39.4	11.9	0.581	0.387	0.336	0.380	0.450	0.405	0.470	0.497
125+600	42.2	39.4	11.9	0.662	0.441	0.382	0.433	0.513	0.462	0.535	0.566
125+800	43.5	39.4	11.9	0.716	0.477	0.413	0.468	0.554	0.499	0.578	0.612
125+995	43.4	39.4	11.9	0.851	0.567	0.491	0.556	0.659	0.593	0.688	0.728
126+197	43.7	39.4	11.9	0.757	0.504	0.437	0.495	0.586	0.528	0.612	0.647
126+397	43.5	39.4	11.9	0.691	0.460	0.399	0.451	0.535	0.481	0.558	0.590
126+593	43.8	39.4	11.9	0.835	0.556	0.482	0.546	0.647	0.582	0.675	0.714
126+793	43.1	38.4	11.9	0.740	0.506	0.452	0.498	0.580	0.528	0.607	0.638
126+996	43.9	38.4	11.9	0.651	0.445	0.398	0.438	0.510	0.464	0.534	0.561
127+202	43.2	38.4	11.9	0.555	0.380	0.339	0.373	0.435	0.396	0.455	0.479
127+601	43.7	38.4	11.9	0.474	0.324	0.290	0.319	0.372	0.338	0.389	0.409
127+800	43.6	38.4	11.9	0.731	0.500	0.447	0.492	0.573	0.521	0.599	0.630
127+997	43.5	38.4	11.9	0.702	0.480	0.429	0.472	0.550	0.500	0.575	0.605
128+199	43.3	38.4	11.9	0.885	0.605	0.541	0.595	0.694	0.631	0.726	0.763
128+403	42.8	38.4	11.9	0.350	0.239	0.214	0.235	0.274	0.249	0.287	0.301
128+599	42.0	38.4	11.9	0.673	0.461	0.412	0.453	0.528	0.480	0.552	0.581
128+801	43.3	38.4	11.9	0.664	0.454	0.406	0.446	0.520	0.473	0.544	0.572
128+999	43.1	37.1	11.9	0.614	0.433	0.400	0.427	0.488	0.450	0.512	0.535

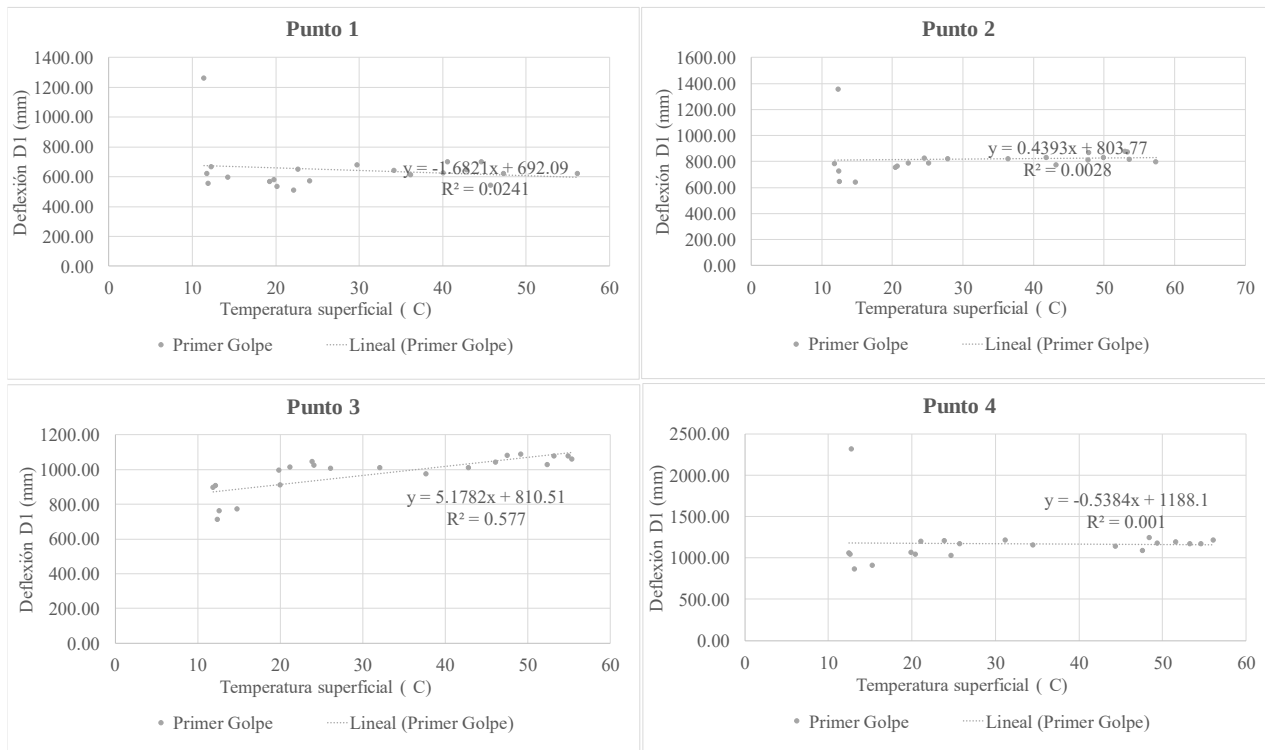
Anexo 6.1 Tabla de resultados del corredor 1 ejemplificado con el gráfico de la imagen 39

Anexo 7. Resultados de las pruebas de campo

RESULTADOS DE LAS DEFLEXIONES REALIZADAS EL PRIMER DÍA DE PRUEBA

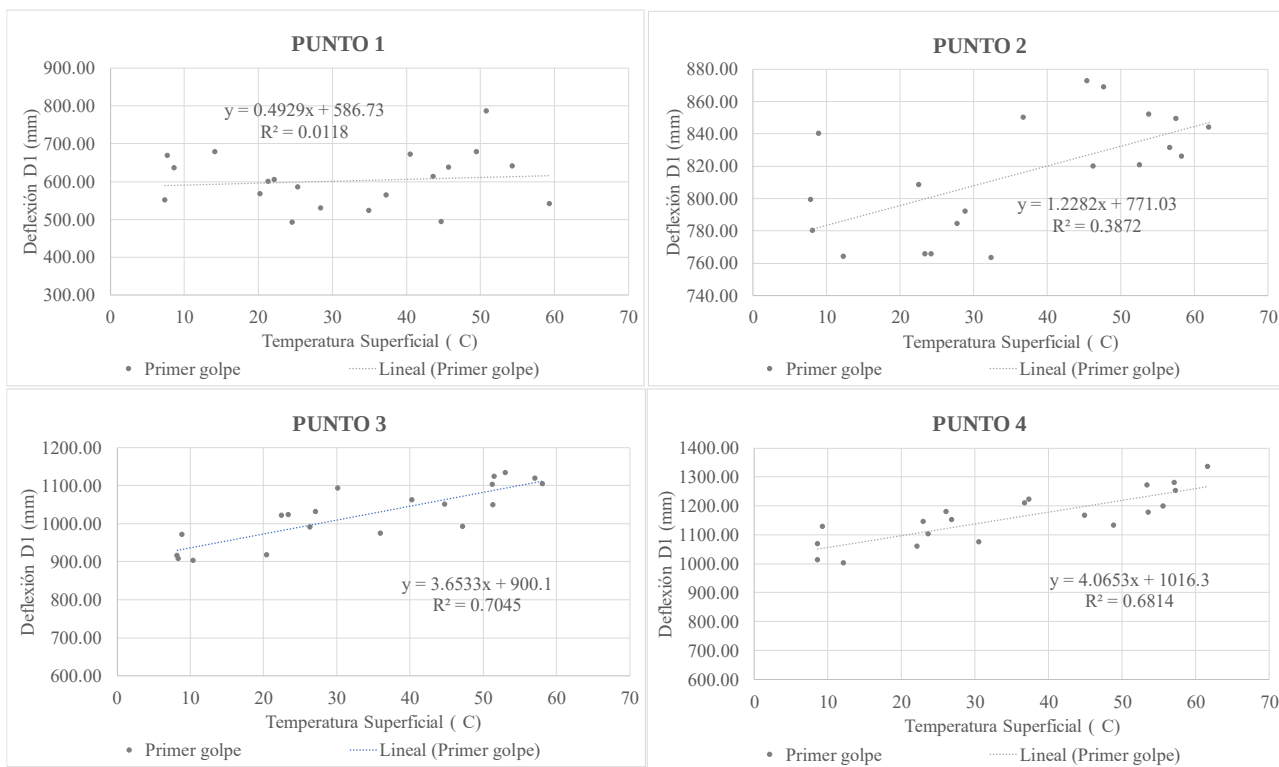


RESULTADOS DE LAS DEFLEXIONES REALIZADAS EL SEGUNDO DÍA DE PRUEBA



Anexo 7.1 Resultados deflexiones máximas y temperatura superficial en cada punto de prueba del día 1 y día 2

RESULTADOS DE LAS DEFLEXIONES REALIZADAS EL SEGUNDO DÍA DE PRUEBA



Anexo 7.2 Resultados deflexiones máximas y temperatura superficial en cada punto de prueba del día 3