



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**DETERMINACIÓN DEL TIPO DE CEMENTO ASFÁLTICO SEGÚN EL GRADO DE
DESEMPEÑO PARA EL DISEÑO DE LA CARPETA DE RODADURA, DE ACUERDO
A LA ZONIFICACIÓN CLIMÁTICA DEL PAÍS DE GUATEMALA**

Rudidaniilo Miranda Calderón

Asesorado por la Inga. Martha Dina Avellán Cruz

Guatemala, septiembre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DEL TIPO DE CEMENTO ASFÁLTICO SEGÚN EL GRADO DE
DESEMPEÑO PARA EL DISEÑO DE LA CARPETA DE RODADURA, DE ACUERDO
A LA ZONIFICACIÓN CLIMÁTICA DEL PAÍS DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

RUDIDANILO MIRANDA CALDERÓN

ASESORADO POR LA INGA. MARTHA DINA AVELLÁN CRUZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

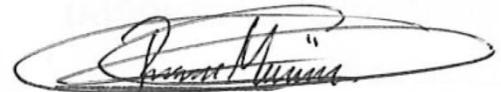
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco
EXAMINADOR	Ing. Silvio José Rodríguez Serrano
EXAMINADORA	Inga. Mayra Rebeca García Soria de Sierra
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DETERMINACIÓN DEL TIPO DE CEMENTO ASFÁLTICO SEGÚN EL GRADO DE DESEMPEÑO PARA EL DISEÑO DE LA CARPETA DE RODADURA, DE ACUERDO A LA ZONIFICACIÓN CLIMÁTICA DEL PAÍS DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 28 de agosto 2014.



Rudidaniilo Miranda Calderón

Guatemala 20 de julio de 2015

Ingeniero

Hugo Leonel Montenegro

Director de la Escuela de Ingeniería Civil

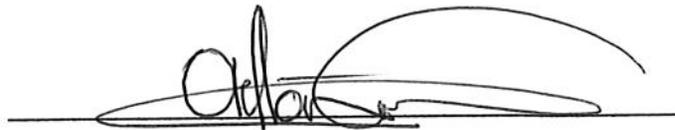
Escuela de Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería

Estimado Ing. Montenegro:

Por medio de la presente me dirijo a usted para informarle que el trabajo de graduación **“DETERMINACIÓN DEL TIPO DE CEMENTO ASFÁLTICO SEGÚN EL GRADO DE DESEMPEÑO PARA EL DISEÑO DE LA CARPETA DE RODADURA, DE ACUERDO A LA ZONIFICACIÓN CLIMÁTICA DEL PAÍS DE GUATEMALA”**, elaborado por el estudiante Rudidanilo Miranda Calderón, que se identifica con el número de carné 200540450, ha sido finalizado a satisfacción y revisado por mí, por lo cual recomiendo su aprobación.

Sin otro particular me suscribo de usted,



Inga. Martha Dina Avellán Cruz

Colegiado No. 8656

Inga. Dina Avellan Cruz
INGENIERA CIVIL COL. 8656



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala, 19 de Agosto de 2015

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro:

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **“DETERMINACIÓN DEL TIPO DE CEMENTO ASFÁLTICO SEGÚN EL GRADO DE DESEMPEÑO PARA EL DISEÑO DE LA CARPETA DE RODADURA, DE ACUERDO A LA ZONIFICACIÓN CLIMÁTICA DEL PAÍS DE GUATEMALA”** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Rudidanilo Miranda Calderón con carné 2005-40450, quien contó con la asesoría de la Inga. Martha Dina Avellán Cruz.

Considero que este trabajo está bien desarrollado y representa un aporte para la Facultad de Ingeniería y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

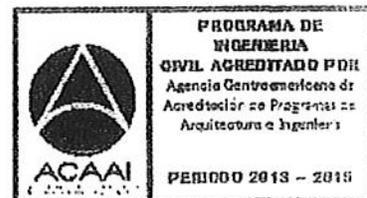
Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Mario Estuardo Arriola Ávila
Coordinador del Área de Topografía y Transportes



Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen de la Asesora Inga. Martha Dina Avellán Miranda Calderón y del Coordinador del Área de Topografía y Transportes , Ing. Mario Estuardo Arriola Ávila, al trabajo de graduación del estudiante Rudidanilo Miranda Calderón, titulado **DETERMINACIÓN DEL TIPO DE CEMENTO ASFÁLTICO SEGÚN EL GRADO DE DESEMPEÑO PARA EL DISEÑO DE LA CARPETA DE RODADURA, DE ACUERDO A LA ZONIFICACIÓN CLIMÁTICA DEL PAÍS DE GUATEMALA** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, septiembre 2015

/bbdeb.

Mas de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Continua





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **DETERMINACIÓN DEL TIPO DE CEMENTO ASFÁLTICO SEGÚN EL GRADO DE DESEMPEÑO PARA EL DISEÑO DE LA CARPETA DE RODADURA, DE ACUERDO A LA ZONIFICACIÓN CLIMÁTICA DEL PAÍS DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Rudidaniilo Miranda Calderón**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, septiembre de 2015

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por concederme el don de la vida y permitirme alcanzar este triunfo. Él es la fuente de sabiduría y de conocimiento, sin cuya voluntad nada no hubiera sido posible.

Mis padres

Rudidanielo Antonio Miranda Moscoso y Magda Eliuth Calderón Miranda, por ser el regalo más maravilloso que Dios me ha dado, ya que con su ejemplo, esfuerzo, visión y dedicación ha sido posible que juntos alcancemos este sueño.

Mis hermanas

Profunda gratitud, ya que su ejemplo y apoyo han sido fundamentales para el logro de este objetivo.

Mis abuelos

Un reconocimiento profundo a su invaluable amor, apoyo y cariño; factores importantes en mi formación moral y espiritual.

Mi familia

Gracias por sus actos y consejos que me han fortalecido en todo momento; valoro su solidaridad y plegarias al Señor, las cuales indudablemente han sido escuchadas y se han convertido en faro de luz en mi camino.

Mi novia

Natalia María Valdes Argueta, por brindarme su apoyo incondicional en todo momento y ser esa persona que Dios, sin duda, ha puesto a mi lado para alentarme a seguir adelante hasta alcanzar todos los deseos de mi corazón.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme la oportunidad de crecer profesionalmente.
Facultad de Ingeniería	Por los conocimientos compartidos.
Ing. José Agüero	Por la confianza, apoyo y amistad brindada a lo largo de toda la investigación.
Inga. Dina Avellán	Por el esfuerzo y dedicación, quien, con sus conocimientos y experiencia, logró que pueda terminar mi trabajo de graduación.
Asfalgua	A todo el personal, por el apoyo incondicional en cada momento que lo necesitaba.
LanammeUCR	Por su apoyo en la realización de los ensayos necesarios para que esta investigación se llevara a cabo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. CEMENTO ASFÁLTICO.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Composición y clasificación química del asfalto	2
1.3. Obtención del asfalto.....	3
1.3.1. Destilación atmosférica.....	4
1.3.2. Destilación al vacío.....	5
1.3.3. Asfaltos naturales	5
1.4. Usos y función del asfalto.....	5
1.5. Propiedades y comportamiento del asfalto.....	6
1.5.1. Propiedades del asfalto	6
1.5.1.1. Durabilidad.....	6
1.5.1.2. Adhesión y cohesión.....	6
1.5.1.3. Endurecimiento por envejecimiento.....	7
1.5.1.4. Pureza	7
1.5.2. Comportamiento del asfalto.....	8
1.5.2.1. Susceptibilidad a la temperatura.....	8
1.6. Clasificación del asfalto	9
1.6.1. Clasificación por grados de penetración.....	9

1.6.1.1.	Procedimientos especificados para la clasificación por grados de penetración.....	10
1.6.1.2.	Desventajas de la clasificación por grados de penetración.....	10
1.6.2.	Clasificación por grados de viscosidad	11
1.6.2.1.	Procedimientos especificados para la clasificación por grados de viscosidad.....	13
1.6.2.2.	Desventajas de la clasificación por grados de viscosidad.....	14
1.6.3.	Clasificación por grados de desempeño.....	15
1.6.3.1.	Procedimientos especificados para la clasificación por grados de desempeño.....	16
1.6.3.1.1.	Reómetro de corte directo	16
1.6.3.1.2.	Viscosímetro rotativo.....	18
1.6.3.1.3.	Reómetro de viga a flexión.....	19
1.6.3.1.4.	Ensayo de tracción directa	20
1.6.3.1.5.	Ensayo de película delgada en horno rotativo	21
1.6.3.1.6.	Cámara de envejecimiento a presión	22

2.	ESPECIFICACIONES SUPERPAVE PARA LA CLASIFICACIÓN DE LIGANTES ASFÁLTICOS	25
2.1.	Deforcación permanente	27
2.2.	Deforcación por fatiga	28
2.3.	Deforcación por bajas temperaturas	29
3.	SELECCIÓN DEL LIGANTE ASFÁLTICO BASADO EN EL GRADO DE DESEMPEÑO (PG)	31
3.1.	Grado de desempeño (PG)	31
3.2.	Efectos de la velocidad de carga en la selección del ligante ...	32
3.3.	Temperatura del aire	34
3.4.	Base de datos climáticos	35
3.5.	Confiabilidad	40
3.6.	Obtención de las temperaturas del aire a diferentes niveles de confiabilidad.....	43
4.	MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA TEMPERATURA DEL PAVIMENTO	55
4.1.	Modelos de SHRP para la predicción de la temperatura alta y baja del pavimento.....	56
4.2.	Cálculo de los modelos SHRP a diferentes niveles de confiabilidad.....	61
4.3.	Modelos LTPP para la predicción de la temperatura alta y baja del pavimento	62
5.	TEMPERATURAS DEL PAVIMENTO OBTENIDAS A PARTIR DE LOS MODELOS SHRP Y LTPP	69
5.1.	Temperatura máxima del pavimento (SHRP Y LTPP).....	69
5.2.	Temperatura mínima del pavimento (SHRP y LTPP)	73

6.	MAPAS DE GRADO DE DESEMPEÑO DEL PAÍS	79
6.1.	Determinación de zonas para el desarrollo de modelos PG según la elevación.....	79
6.2.	Modelos de grados de desempeño PG en función de la zona	83
6.3.	Metodología ArcGIS para obtener los mapas de PG.	91
7.	PROPUESTA DE ZONIFICACIÓN POR GRADO DE DESEMPEÑO.....	97
7.1.	Introducción.....	97
7.1.1.	Modelo de grado de desempeño en Guatemala	98
7.2.	Zonificación propuesta	98
8.	DETERMINACIÓN DEL TIPO DE CEMENTO ASFÁLTICO SEGÚN EL GRADO DE DESEMPEÑO.....	105
	CONCLUSIONES.....	109
	RECOMENDACIONES	111
	BIBLIOGRAFÍA.....	113
	APÉNDICES.....	115
	ANEXOS.....	131

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Historia de la evolución de la red de carreteras	2
2.	Composición química del asfalto 1	3
3.	Composición química del asfalto 2.....	4
4.	Susceptibilidad del asfalto ante la temperatura.....	8
5.	Ensayo de penetración.....	10
6.	Ensayo de viscosidad.....	13
7.	Desventajas de los ensayos de penetración y viscosidad.....	15
8.	Reómetro de corte directo	17
9.	Cálculo de G^* y δ	17
10.	Viscosímetro rotatorio	18
11.	Reómetro de viga a flexión.....	20
12.	Ensayo de tracción directa	21
13.	Ensayo de película delgada en horno rotativo	22
14.	Cámara de envejecimiento a presión	23
15.	Deformación permanente.....	27
16.	Deformación por fatiga	28
17.	Deformación por bajas temperaturas	30
18.	Mapa de estaciones meteorológicas de Guatemala.....	36
19.	Mapa de estaciones meteorológicas de Guatemala utilizadas en la investigación	38
20.	Valores de latitud en Guatemala	40
21.	Confiabilidad según el porcentaje	41
22.	Temperatura máxima del aire	47

23.	Distribución de la temperatura máxima.....	48
24.	Distribución de la desviación estándar de las estaciones meteorológicas - temperatura máxima del aire	49
25.	Temperatura mínima del aire	52
26.	Distribución de la temperatura mínima	53
27.	Distribución de la desviación estándar de las estaciones meteorológicas - temperatura mínimas del aire	54
28.	Estimación de la temperatura mínima del pavimento con el modelo SHRP	57
29.	Estimación de la temperatura máxima del pavimento con el modelo SHRP	60
30.	Resultados de las temperaturas máximas de los sistema SHRP y LTPP a un 50 % de confianza	71
31.	Resultados de las temperaturas máximas de los sistemas SHRP y LTPP a un 85 % de confianza	72
32.	Resultados de las temperaturas mínimas de los sistemas SHRP y LTPP a un 50 % de confianza	75
33.	Resultados de las temperaturas mínimas de los sistemas SHRP y LTPP a un 85 % de confianza	76
34.	Comportamiento entre la temperatura máxima del aire y la elevación.....	82
35.	Comportamiento entre la temperatura promedio del aire y la elevación.....	82
36.	Comportamiento entre la temperatura mínima del aire y la elevación.....	83
37.	Estaciones meteorológicas y ubicación de las regiones	84
38.	Tipos de representación mediante SIG.....	92
39.	Ejemplo de operación empleado superposición de Raster.	93
40.	Distribución por departamento de PG a 50 % de confiabilidad	100

41.	Propuesta de PG por departamento a un 50 % de confiabilidad.....	101
42.	Distribución por departamento de PG a 85 % de confiabilidad	103
43.	Propuesta de PG por departamento a un 85 % de confiabilidad.....	104

TABLAS

I.	Especificaciones por grado de viscosidad a 60 °C (asfalto original)	11
II.	Especificaciones por grado de viscosidad a 60 °C (asfalto envejecido).....	12
III.	Equipos de ensayo, procedimientos y criterios de Superpave	16
IV.	Especificaciones Superpave para ligantes asfálticos	26
V.	Grados actuales en la especificación Superpave.....	31
VI.	Tabla para definir el aumento del PG para la temperatura máxima del pavimento.....	32
VII.	Estaciones meteorológicas de Guatemala	36
VIII.	Estaciones meteorológicas de Guatemala utilizadas	39
IX.	Valores de desviación estándar según el porcentaje de confiabilidad	42
X.	Temperaturas máximas del aire de las estaciones meteorológicas	46
XI.	Temperaturas promedio del aire de las estaciones meteorológicas	49
XII.	Temperaturas mínimas del aire de las estaciones meteorológicas.....	50
XIII.	Variable más significativa del modelo LTPP–temperatura mínima del pavimento.....	62
XIV.	Variables más significativas del modelo LTPP–temperatura máxima del pavimento.....	65
XV.	Temperatura máxima del pavimento obtenida para cada estación meteorológica según el modelo SHRP o LTPP.....	69
XVI.	Temperatura mínima del pavimento obtenida para cada estación meteorológica según el modelo SHRP y LTPP	73

XVII.	Zonas climáticas de Guatemala.....	80
XVIII.	Estaciones meteorológicas de la vertiente atlántica	80
XIX.	Estaciones meteorológicas de la vertiente pacífica	81
XX.	Resultados obtenidos de las temperaturas máximas del aire y temperaturas del pavimento por SHRP y LTPP	85
XXI.	Resultados obtenidos de las temperaturas mínimas del aire y temperaturas del pavimento por SHRP y LTPP	87
XXII.	PG recomendado a un nivel de confiabilidad de 50 %.....	99
XXIII.	PG recomendado a un nivel de confiabilidad de 85 %.....	102
XXIV.	Resultados de la caracterización de las muestras de asfalto	106

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
mm	Milímetro
msnm	Metros sobre el nivel del mar

GLOSARIO

Asfalto	Mineral negro de origen natural u obtenido artificialmente por destilación del petróleo.
Agregado	Materiales inertes de determinadas características que conforman el concreto, excluyendo el agua.
API	American Petroleum Institute.
Cemento asfáltico	Material especialmente preparado en cuanto a calidad o consistencia para ser usado directamente en la construcción de pavimentos asfálticos.
Creep	Es el incremento de deformación que sufre un material viscoelástico cuando está sometido a una tensión mecánica constante.
Deformación	Cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a esfuerzos internos producidos por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo.
Estación meteorológica	Instalación destinada a medir y registrar regularmente diversas variables meteorológicas.
ESAL	Número de ejes equivalentes.

FC	Factor de camión de cada vehículo.
Gravedad API	Unidad de medida de densidad que, en comparación con el agua, precisa cuán pesado o liviano es el petróleo.
Isotermas	Curva que une aquellos puntos que presentan las mismas temperaturas en una unidad de tiempo considerada.
Insivumeh	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
LTPP	Sistema para seleccionar el ligante asfáltico basado en la temperatura del pavimento, el cual incluye información de la localización geográfica (latitud y longitud) y elevación de las estaciones, así como el espesor de la carpeta asfáltica.
LDF	<i>Land distribution factor.</i>
PG	Grado de desempeño.
Ráster	Método para el almacenamiento, procesado y visualización de datos geográficos.
SHRP	Sistema para seleccionar el ligante asfáltico basado en la temperatura del pavimento.

TPDA	Tránsito promedio diario anual.
Vertiente	Nombre dado a la principal divisoria hidrológica de América, que separa, a un lado las cuencas que desaguan en el océano Pacífico, al otro lado las cuencas que desaguan en el océano Atlántico.
Viscosidad	Oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales, debido a las fuerzas de cohesión moleculares.

RESUMEN

Al realizar este trabajo de graduación, el principal objetivo es determinar el tipo de cemento asfáltico que se debe utilizar para el diseño de la carpeta de rodadura, según el grado de desempeño, de acuerdo a la zonificación climática para Guatemala.

Se deben recopilar datos de las temperaturas máximas, promedios y mínimas de las estaciones meteorológicas activas del país, durante un período de 5 años (2009 - 2013), para posteriormente calcular las temperaturas del pavimento por medio de los modelos SHRP y LTPP.

El SHRP es un modelo propuestos por el programa Superpave, utilizado para estimar la temperatura máxima y mínima del pavimento a partir de los siete días más calientes de la temperatura máxima de aire y la temperatura mínima del pavimento a partir de la temperatura mínima del aire. LTPP es un modelo utilizado para la predicción de la temperatura del pavimento a partir de las temperaturas del aire de estaciones localizadas en todo el territorio del país. A diferencia del modelo SHRP, el modelo LTPP incluye información de la localización geográfica (latitud y longitud), elevación de las estaciones meteorológicas y el espesor del pavimento.

Con los resultados obtenidos de las temperaturas máximas y mínimas del pavimento por ambos modelos, se procede a determinar las zonas para el desarrollo de modelos PG según su elevación. En lo que concierne al cemento asfáltico, se utilizarán muestras de diferentes tipos producidas en la refinería Perenco, ubicada en el norte del país.

Se debe utilizar la metodología del programa ArcGIS para obtener los mapas de PG, así hacer la propuesta de zonificación por grado de desempeño. Con la zonificación propuesta, se podría determinar el tipo de cemento asfáltico según el grado de desempeño.

OBJETIVOS

General

Definir los tipos de cemento asfáltico, según la clasificación por grado de desempeño, de acuerdo a la zonificación climática asociada con la temperatura del pavimento, que serían apropiados utilizar en cada región del país, tanto en la producción de la mezcla como para labores de conservación vial.

Específicos

1. Realizar un mapa del país donde se especifique la zonificación y el grado de desempeño requerido para el cemento asfáltico, según las temperaturas máximas y mínimas de pavimento.
2. Utilizando el grado de desempeño y las consideraciones de las temperaturas mínimas e intermedias del pavimento, determinar el cemento asfáltico según clasificación.
3. Determinar ecuaciones para calcular la temperatura del pavimento en función de la temperatura ambiente, brillo solar, entre otros, que mejor se ajusten a las condiciones del país.
4. Proporcionar un trabajo de investigación donde se establezcan los parámetros de grado de desempeño de cemento asfáltico para las diferentes regiones de Guatemala.

INTRODUCCIÓN

Debido a que en Guatemala hay diversidad de climas y temperaturas que, aunque no son extremas, afectan la estructura del pavimento, es necesario determinar los tipos de cemento asfáltico requeridos de acuerdo a la clasificación por grado de desempeño, que sería necesario utilizar en cada zona del país.

En este trabajo de investigación se determinará, por medio de la zonificación climática del país, asociada con la temperatura del pavimento y la demanda de cargas de tránsito, qué tipo de cemento asfáltico es recomendable utilizar para que se cumpla con las necesidades requeridas. Esto se logrará por medio de la interacción de la teoría desarrollada por parte del programa Superpave, información de estaciones climatológicas del Insivumeh (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala) y el programa ArcGIS, para representar geoespacialmente la información obtenida.

El programa ArcGIS es un sistema de información geográfica que da la facilidad de realizar el análisis, correlación, además de georeferenciar y modelar espacialmente los datos obtenidos. Este modelo se realizará con el apoyo del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR) quien brindará dicha información.

1. CEMENTO ASFÁLTICO

1.1. Antecedentes

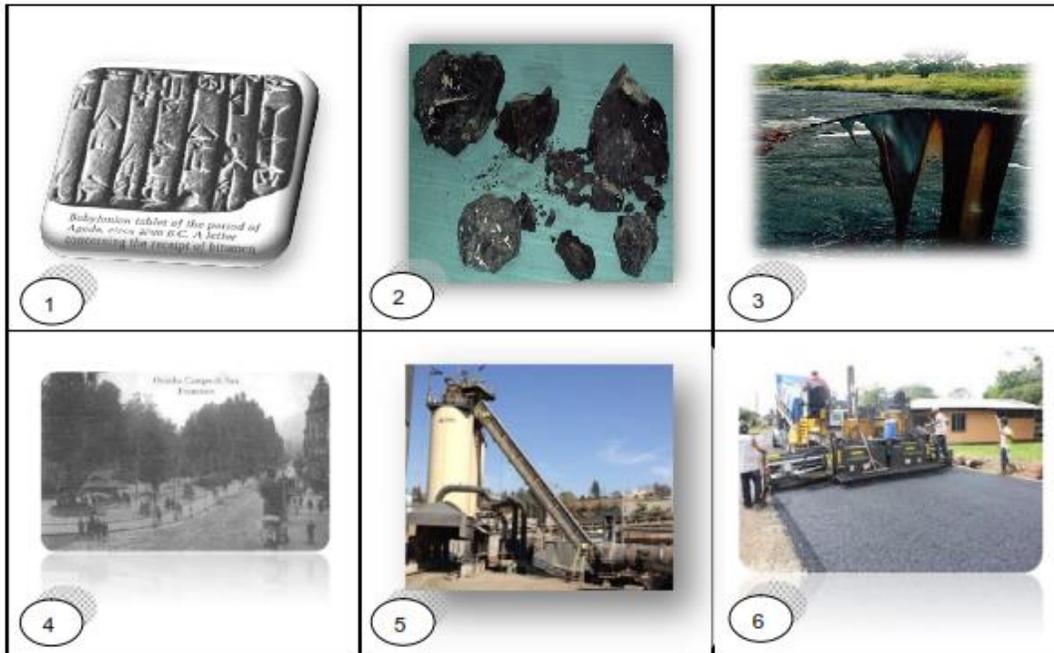
El asfalto, también conocido como cemento asfáltico o ligante asfáltico, se deriva del vocablo *asphatu* o *asphallo*, que significa hacer firme o estable. Es un producto derivado del petróleo, el cual se obtiene de la destilación al vacío del crudo pesado. En excavaciones arqueológicas se determinó que por los años 320 a.C. el Imperio Romano usó por primera vez el material, en Mesopotamia, utilizado para asegurar o unir objetos.

El material se obtenía de yacimientos naturales o rocas asfálticas. Desde la antigüedad hasta en la actualidad, el asfalto ha sido utilizado como cemento para ligar, cubrir o impermeabilizar objetos. Es un material muy versátil, se puede decir que es el material de ingeniería más antiguo utilizado por el hombre¹.

Fue hasta a principios del siglo XIX que en Estados Unidos se triplicó el uso del asfalto por año, dando así un gran salto a las industrias petroleras. El material fue utilizado en las ciudades de Filadelfia y Nueva Jersey para construir banquetas y los primeros pavimentos asfálticos.

¹PFEIFFER, JPh. *The properties of asphaltic bitumen*. p. 3.

Figura 1. **Historia de la evolución de la red de carreteras**

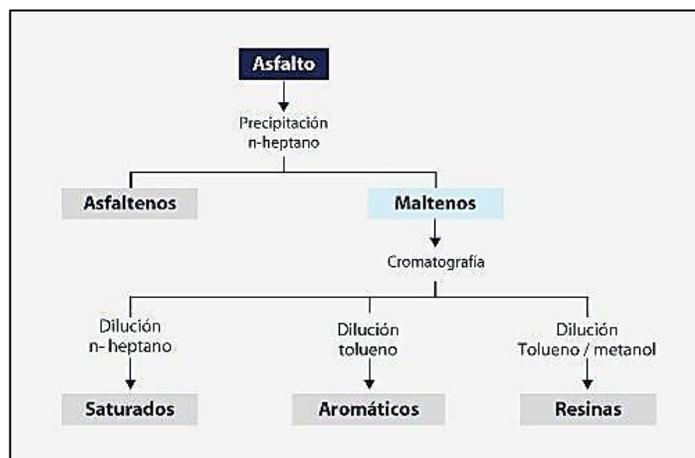


Fuente: elaboración propia, con imágenes tomadas de diversas páginas de internet.

1.2. **Composición y clasificación química del asfalto**

El asfalto está constituido principalmente por tres grupos: asfaltenos, resinas y aceites (aromáticos y saturados). Los asfaltenos contienen todos los metales contenidos en el crudo: níquel, vanadio y hierro. Químicamente, los asfaltenos están compuestos por moléculas de carbono e hidrógeno (entre 80 – 87 %), el porcentaje restante consiste en heteroátomos (azufre, nitrógeno y oxígeno). La proporción del asfalto puede variar dependiendo de los factores ambientales como las altas temperaturas, luz solar, oxígeno, entre otros, los cuales influirán en el desempeño de la vida útil del asfalto.

Figura 2. **Composición química del asfalto 1**

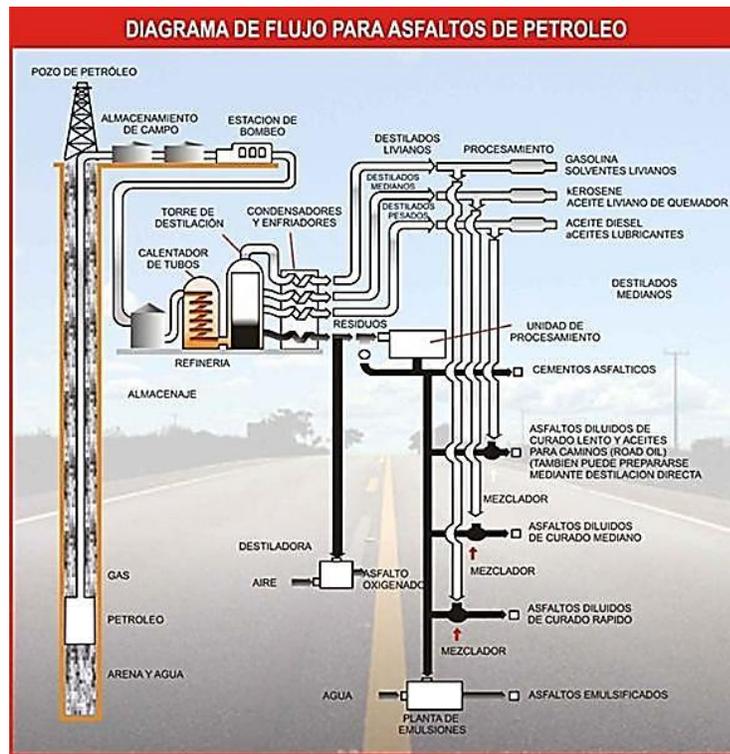


Fuente: Repsol. *Composición del asfalto*. www.repsol.com. Consulta: 12 de septiembre 2014.

1.3. **Obtención del asfalto**

El asfalto se obtiene en refinerías de petróleo crudo, donde se realiza la separación fraccional por destilación. En el proceso de destilación, el asfalto pasa por una serie de cambios físicos y químicos, que permiten remover sustancias como oxígeno, agua, nitrógeno, sal, azufre, sulfuro, entre otros. La cantidad de asfalto obtenida del petróleo crudo depende de la gravedad API del petróleo conforme al Instituto Norteamericano del Petróleo (American Petroleum Institute, API). En general, se obtiene grandes cantidades de asfalto de los petróleos crudos, con una baja gravedad API.

Figura 3. **Composición química del asfalto 2**



Fuente: Rafael Osorio. www.ingenieriadepetroleo.com. Consulta: 12 de septiembre de 2014.

1.3.1. Destilación atmosférica

Se realiza en hornos tubulares donde el crudo del petróleo es calentado hasta alcanzar los 300-350 °C. El objetivo de esta destilación es separar las fracciones ligeras, como nafta, queroseno, gasolina, gas, entre otros. de las fracciones más pesadas, en este caso el asfalto. Las fracciones más pesadas permanecen en el fondo de la torre de destilación atmosférica mientras que las más ligeras, hierven y se evaporan. Por último, las fracciones que quedan en el fondo pasan a la torre de vacío.

1.3.2. Destilación al vacío

La torre de destilación al vacío permite bajar la presión en la columna fraccionaria, así las fracciones pesadas hierven a menor temperatura. Se usa el vapor o el vacío para aumentar la temperatura gradualmente. A estos residuos se les llama residuo de vacío, son utilizados como cemento asfáltico. Según sea la cantidad de vacío que se le aplique a la torre, se pueden obtener diferentes tipos de cemento asfáltico.

1.3.3. Asfaltos naturales

También conocidos como lagos naturales de asfalto, es asfalto que emerge a la superficie debido a la falla producida entre dos placas tectónicas. El petróleo está en movimiento constante hacia la superficie acarreando barro y agua hasta que logra formar un lago visible. Cuando llega a la superficie, se enfría y logra la consistencia necesaria para convertirse en un material semisólido. Los tres lagos reconocidos mundialmente por su tamaño son: lago de Guanoco en Venezuela; La Brea en Trinidad y Tobago, y Rancho La Brea en Los Ángeles, Estados Unidos.

1.4. Usos y función del asfalto

Después de la separación de los aceites lubricantes, se obtiene el cemento asfáltico, el cual es un hidrocarburo semisólido; buen agente cementante. El uso principal del cemento asfáltico es para la producción de mezcla asfáltica, utilizada para la construcción de pavimentos flexibles. El cemento asfáltico es viscoso, altamente impermeable, adherente y su principal característica es que resiste altos refuerzos instantáneos. Los cementos asfálticos se usan para varios propósitos, carreteras, bacheo, aeropuertos, áreas de estacionamiento, calzadas, bordillos, bloques, bóvedas, entre otros.

1.5. Propiedades y comportamiento del asfalto

Dependen de las proporciones de los elementos que están presentes en su composición, la mayoría de ellas se describen a continuación.

1.5.1. Propiedades del asfalto

Las principales propiedades del asfalto para el diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos son:

1.5.1.1. Durabilidad

Cuando los materiales asfálticos se exponen a los elementos del medio ambiente, tiene lugar un deterioro natural gradual, hasta que los materiales pierden su plasticidad y se hacen frágiles. Este cambio lo causa principalmente, las reacciones químicas y físicas que se realizan en el material. Para que un asfalto de pavimentación se comporte adecuadamente como cementante, el deterioro por intemperie debe minimizarse tanto como sea posible. La capacidad de un material asfáltico para resistir el deterioro por intemperie se describe como la durabilidad ².

1.5.1.2. Adhesión y cohesión

La adhesión es la capacidad del asfalto para unirse a los agregados en una mezcla de pavimentación. La cohesión es la capacidad que tiene el asfalto de mantener firmes las partículas del agregado de una mezcla asfáltica en el pavimento terminado.

²GARBER, Nicholas. *Ingeniería de tránsito y carreteras*. p. 917.

1.5.1.3. Endurecimiento por envejecimiento

El endurecimiento es causado por el proceso de oxidación, el cual se lleva a cabo más fácilmente a temperaturas altas y en películas delgadas de asfaltos. El endurecimiento más severo se produce cuando el asfalto está a altas temperaturas y en películas delgadas, durante el proceso de revestimiento de las partículas de agregado.

Si el asfalto es calentado y luego se deja que se enfríe, sus moléculas se reacomodan y forman una estructura tipo gel. Con el transcurso del tiempo, el asfalto seguirá endureciéndose continuamente.

1.5.1.4. Pureza

El cemento asfáltico se encuentra constituido, en su mayor parte, por bitumen, el cual es, por definición, un material totalmente soluble en bisulfuro de carbono. El 99,5 % de los asfaltos refinados son solubles en bisulfuro de carbono y si contienen impurezas, estas son inertes.

El cemento asfáltico carece de agua y humedad, ya que estas fueron perdidas durante el proceso de la refinería. Sin embargo, si el cemento asfáltico contiene agua o humedad, este puede volverse espumoso al ser calentado a temperaturas mayores a los 100 °C. La pureza del cemento asfáltico está definida por la ausencia de humedad, entre menos agua o impurezas contenga, mejor será su calidad.

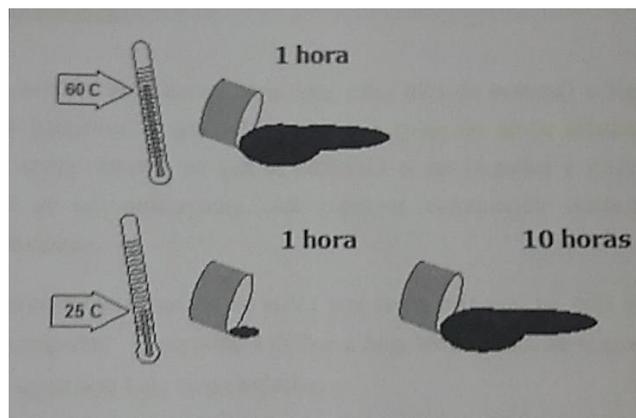
1.5.2. Comportamiento del asfalto

El Instituto de Asfalto de Estados Unidos elaboró un sistema para caracterizar el comportamiento del asfalto; propuesto en el programa SHRP (Strategic Highway Research Program). También se menciona en la norma ASTM D-6373, la cual incluye las temperaturas máximas y mínimas del pavimento en función de la temperatura del aire y la latitud geográfica. Este sistema también puede predecir el comportamiento del asfalto al envejecer.

1.5.2.1. Susceptibilidad a la temperatura

El cemento asfáltico es un material termoplástico, por lo que su comportamiento depende de la temperatura a la que se encuentre. También se ve afectado por el tiempo de carga que contenga. Por ejemplo, el comportamiento de flujo de un cemento asfáltico puede ser el mismo en el lapso de una hora a 50 °C que en 10 horas a 20 °C.

Figura 4. Susceptibilidad del asfalto ante la temperatura



Fuente: Instituto del Asfalto. *Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de Superpave*. p. 1.

Cuando el cemento asfáltico está en climas calientes, actúa como un líquido viscoso y fluye. Estos líquidos viscosos también son llamados plásticos, porque cuando fluyen, nunca regresan a su posición original.

A bajas temperaturas, el cemento asfáltico actúa como un sólido elástico. Puede comportarse como un resorte, ya que cuando se le aplica una carga, se deforma, pero, una vez es retirada estos vuelven a su forma original. El problema se presenta cuando se aplica una carga excesiva, debido a que pueden llegar a romperse.

Si el cemento asfáltico se encuentra en una zona de clima intermedia, puede comportarse de ambas formas, como un líquido viscoso y como un sólido elástico, dependiendo de la temperatura y el tiempo de carga.

1.6. Clasificación del asfalto

Para clasificar los asfaltos se debe tener en cuenta la consistencia del cemento asfáltico a varias temperaturas, la susceptibilidad al envejecimiento y las propiedades relacionadas a la pureza. Los asfaltos se pueden clasificar en tres diferentes sistemas:

1.6.1. Clasificación por grados de penetración

En la clasificación por grados de penetración se mide la consistencia del cemento asfáltico. Para realizar este método se aplica la Norma ASTM D-946 (*Clasificación estándar por grado de penetración para cementos asfálticos utilizados en pavimentos*). Al concluir el método de clasificación se obtienen cinco diferentes grados: 40-50, 60-70, 85-100, 120-150, 200-300.

Figura 5. **Ensayo de penetración**



Fuente: *Clasificación por grados de penetración*. <http://proetisa.com/proetisa-productos.php?ID=108>. Consulta: 1 de octubre de 2014.

1.6.1.1. Procedimientos especificados para la clasificación por grados de penetración

Este método consiste en estabilizar la muestra de cemento asfáltico a una temperatura de 25 °C en un baño de María con agua, a temperatura regulada. Luego, se penetra una aguja dentro de la muestra bajo una carga de 100 g, por un tiempo exacto de 5 segundos. La distancia que penetra la aguja es registrada en unidades de 0,1 mm.

1.6.1.2. Desventajas de la clasificación por grados de penetración

Las desventajas que presenta este método son: solo describe la consistencia del cemento asfáltico a una temperatura de 25 °C, por lo que no se sabe cómo podrá comportarse a temperaturas altas o bajas. Los ensayos se realizan con muestras sin envejecer o con muestras envejecidas artificialmente,

esto se hace con el fin de simular el envejecimiento durante la etapa de construcción, dejando a un lado un factor significativo en el fisuramiento por altas y bajas temperaturas. No describe claramente las ventajas o posibles desventajas de algunos asfaltos modificados.

1.6.2. Clasificación por grados de viscosidad

Para realizar este método, se debe aplicar la Norma ASTM D-3381, la cual especifica los ensayos y especificaciones requeridas del sistema de clasificación por viscosidad. Regularmente, los trabajos de pavimentos requieren ciertos valores de viscosidad a temperaturas de 60 y 135 °C. La unidad de medida a utilizar es el poise (P). La temperatura de 60 °C representa la temperatura típica máxima experimentada por el pavimento y la de de 135 °C simula, en promedio, la temperatura que experimenta el pavimento durante la mezcla y la colocación en el campo.

La clasificación del asfalto es: AC-5, AC-10, AC-20, AC-30 y AC-40. La numeración indica la viscosidad a 60 °C en cientos de poises.

Tabla I. **Especificaciones por grado de viscosidad a 60 °C (asfalto original)**

CARACTERISTICA	UNIDAD	METODO ASTM	Clasificación por viscosidad (grados basados en asfalto original)					
			AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosidad, 60°C	N s/m ²	D-2170	250 ± 50	500 ± 100	1000 ± 200	2000 ± 400	3000 ± 600	4000 ± 800
Viscosidad, 135°C, mínimo	mm ² /s	D-2170	125	175	250	300	350	400
Penetración, 25°C, 100g,5s, mínimo	1/10 mm	D-5	220	140	80	60	50	40
Punto de inflamación, Cleveland de Copa Abierta, mínimo	°C	D-92	163	177	219	232	232	232
Solubilidad en tricloroetileno, mínimo	%	D-2042	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
Pruebas sobre residuo del ensayo de horno sobre película delgada ASTM D-1754								

Continuación de la tabla I.

Viscosidad, 60°C, máx.	N s/m ²	D-2171	1,250	2,500	5,000	10,000	15,000	20,000
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, mínimo	Cm	D-113	100 ^A	100	75	50	40	25

Fuente: ASTM D – 3381. *Tabla de clasificación por viscosidad.* <http://tablas.com/viscosidad-asfalto.php?ID=108>. Consulta: 1 de octubre de 2014.

Tabla II. Especificaciones por grado de viscosidad a 60 °C (asfalto envejecido)

CARACTERISTICA	UNIDAD	METODO ASTM	Clasificación en residuo asfáltico (grados basados en residuo asfáltico)									
			AR-1000		AR-2000		AR-4000		AR-8000		AR-16000	
			Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
Viscosidad, 60°C	N s/m ²	D-2170	750	1250	1500	2500	3000	5000	6000	10000	12000	20000
Viscosidad, 135°C, mínimo	mm ² /s	D-2170	140	--	200	--	275	--	400	--	550	--
Penetración, 25°C, 100g, 5s, mínimo	1/10 mm	D-5	65	--	40	--	25	--	20	--	20	--
% de Penetración original	°C		---		40		45		50		52	
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, mínimo	cm	D-113	100		100		75		75		75	
Pruebas sobre el asfalto original												
Punto de inflamación, Cleveland de Copa Abierta, mínimo	°C	D-92	205	--	219	--	227	--	232	--	238	--
Solubilidad en tricloroetileno, mínimo	%	D-2042	99.0		99.0		99.0		99.0		99.0	

Fuente: ASTM D – 3381. <http://tablas.com/viscosidad-asfalto.php?ID=108>. Consulta: 1 de octubre 2014.

Figura 6. **Ensayo de viscosidad**



Fuente: *Ensayo de viscosidad*. www.lemco.utsfm.cl. Consulta: 5 de octubre de 2014.

1.6.2.1. Procedimientos especificados para la clasificación por grados de viscosidad

Para el método de viscosidad a 60 °C se utiliza un viscosímetro de tubo capilar, el cual es un tubo calibrado de vidrio que mide el flujo del asfalto. El viscosímetro es colocado en un baño de María con temperatura controlada y se precalienta a 60 °C. Se vierte, en el extremo ancho del viscosímetro una muestra del asfalto, la cual se calienta a la misma temperatura. Es necesario un vacío parcial en el extremo pequeño del tubo para que el asfalto pueda fluir. Se debe tomar nota del tiempo que el asfalto pasa de una marca a la otra. Este tiempo es convertido a poises.

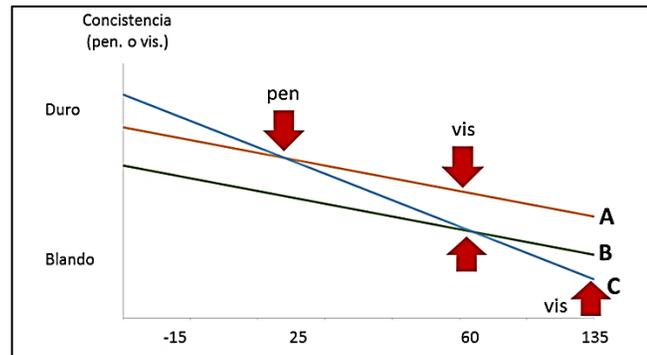
El método para calcular la viscosidad a 135 °C es igual al anterior, solo que se debe utilizar un aceite claro en el baño con temperatura controlada debido a que el agua se evaporaría a 135 °C. Se debe utilizar un viscosímetro que no requiera del vacío, debido a que el asfalto a 135 °C contiene la suficiente fluidez necesaria. En vez de convertirlo a poises, se convierte a centistokes, debido a que el flujo a través del tubo es inducido por gravedad y no por vacío.

1.6.2.2. Desventajas de la clasificación por grados de viscosidad

Algunas de las desventajas que presentan los ensayos por grados de viscosidad son:

- Los ensayos se realizan a temperaturas estándar sin considerar el clima de la zona donde será colocado el ligante asfáltico.
- Únicamente se obtiene información sobre su comportamiento a altas temperaturas, por lo que se desconoce cómo podría comportarse a bajas temperaturas.
- Se realizan con muestras sin envejecer.
- Pueden clasificarse diferentes cementos asfálticos con el mismo grado, cuando en realidad tienen diferentes características.

Figura 7. **Desventajas de los ensayos de penetración y viscosidad**



Fuente: elaboración propia.

1.6.3. Clasificación por grados de desempeño

Debido a las deficiencias que mostraron los métodos de penetración y viscosidad, el programa de investigaciones SHRP (Strategic Highway Research Program) desarrolló un sistema llamado Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavement*), el cual contiene una amplia gama de ensayos y procedimientos, nuevos sistemas de diseño y análisis de mezcla asfáltica, nuevos equipos y una serie de especificaciones basadas en el grado de desempeño para ligantes asfálticos.

El objetivo del sistema Superpave, por medio del grado de desempeño, es aumentar la resistencia a la fatiga y la deformación permanente, tomando en cuenta las diferentes condiciones que presenta el envejecimiento. El software Superpave es un programa de computación que auxilia al ingeniero en la selección de materiales y el diseño de mezclas. Sin embargo, el término

Superpave tiene un alcance mayor que el de un simple programa de computación³.

Tabla III. **Equipos de ensayo, procedimientos y criterios de Superpave**

Procedimientos	Objetivos
Reómetro de Corte Directo (DSR)	Medir propiedades a temperaturas altas e intermedias.
Viscosímetro Rotativo (RV)	Medir propiedades a altas temperaturas.
Reómetro de Viga a Flexión (BBF) Ensayo de Tracción Directa (DDT)	Medir propiedades a bajas temperaturas.
Horno Rotativo de Película Delgada (RTFO)	Simular el endurecimiento durante la etapa constructiva.
Cámara de Envejecimiento a Presión (PAV)	Simular el envejecimiento durante la vida útil.

Fuente: Instituto del Asfalto. *Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de Superpave*. p. 8.

1.6.3.1. Procedimientos especificados para la clasificación por grados de desempeño

Los procedimientos necesarios para la clasificación por grado de desempeño se describen a continuación.

1.6.3.1.1. Reómetro de corte directo

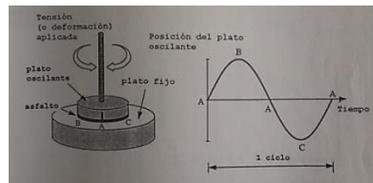
Este tipo de ensayo es realizado para caracterizar las propiedades viscoelásticas de los ligantes asfálticos. La muestra de asfalto es sometida a un esfuerzo de deformación controlado y a una velocidad constante. Se calcula el

³Instituto del Asfalto. *Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de Superpave*. p. 8.

módulo complejo en corte (G^*) y el ángulo de fase (δ), sometido a una muestra pequeña de ligante a tensiones de corte oscilante. Se debe medir la respuesta de la deformación específica de corte del espécimen sometido a un torque, la cual está desfasada un intervalo de tiempo con relación a la tensión aplicada.

Los ligantes asfálticos a altas temperaturas se comportan como un fluido viscoso y a temperaturas bajas como una muestra sólida elástica. El rango de temperaturas utilizadas en ensayo de reómetro de corte directo son de 4 °C – 85 °C, y el rango para G^* está entre 0,1 k Pa y 10 000 kPa.

Figura 8. **Reómetro de corte directo**



Fuente: Instituto del Asfalto. *Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de Superpave*. p. 23.

Figura 9. **Cálculo de G^* y δ**



Fuente: MEXICANO, Jesús. *Presentación asfaltos modificados con SBS sobre losas de concreto hidráulico*. construgate.com/nuevo/index.php/blogbitacora?start=44. Consulta: 7 de octubre de 2014.

1.6.3.1.2. Viscosímetro rotativo

El ensayo se determina midiendo el torque necesario para mantener constante la velocidad rotacional de un vástago cilíndrico, sumergido en una muestra de asfalto a una temperatura constante. El resultado permite determinar el manejo del cemento asfáltico a altas temperaturas para asegurar el fluido en las operaciones de bombeo, mezclado y colocación de control de acceso al medio (MAC), siendo este su principal objetivo. La Norma ASTM D-4402 determina que el ligante requiere una viscosidad menor a 3 Pa-s para la temperatura de 135 °C. El viscosímetro también puede ser utilizado para desarrollar curvas de viscosidad-temperatura, empleadas para estimar las temperaturas de mezclado y compactación de las mezclas en el campo.

Figura 10. Viscosímetro rotatorio



Fuente: Laboratorios Asfalgua.

1.6.3.1.3. Reómetro de viga a flexión

Por medio de este ensayo se mide la rigidez del ligante asfáltico que presenta a bajas temperaturas. Debido a que la mayoría de reómetros de corte directo no pueden ser usados para calcular las propiedades, SHRP utiliza la teoría de vigas para medir la rigidez de una pequeña viga de asfalto simplemente apoyada bajo carga de *creep*. Es un dispositivo que puede medir la deflexión de un ligante bajo carga constante a una temperatura baja, cuando el asfalto se comporta como un sólido elástico.

Se le coloca una carga constante a la viga de asfalto durante cuatro minutos, se mide la deformación sufrida en el centro de la viga en forma continua durante ese tiempo. De esta forma se podrá saber cuánto será la rigidez a la fluencia y la variación de la rigidez en función del tiempo.

Los ensayos de corte dinámico y de viga a flexión suministran información referente a la rigidez de los ligantes en un amplio rango de temperaturas. Aún cuando la rigidez puede también ser usada para estimar propiedades (resistencia) a la falla, para algunos ligantes, especialmente asfaltos modificados, la relación entre rigidez y resistencia (a la falla) no es bien conocida. Por lo tanto, debe realizarse un ensayo adicional para medir la resistencia y capacidad de alargamiento antes de la rotura (deformación a la falla). Este ensayo es el ensayo de tracción directa.

Figura 11. **Reómetro de viga a flexión**



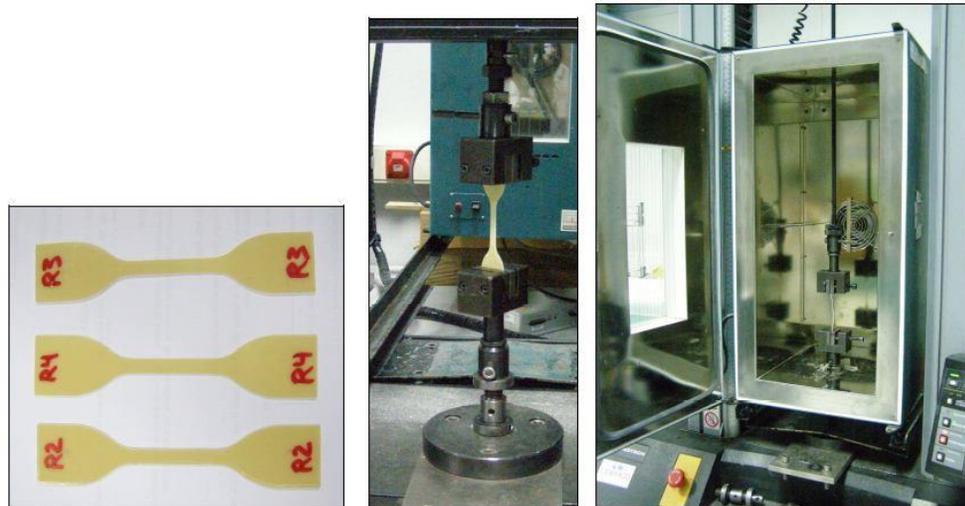
Fuente: Laboratorios Asfalgua.

1.6.3.1.4. Ensayo de tracción directa

Investigaciones realizadas por SHRP, utilizando el equipo de reómetro de viga en flexión (BBR), demostraron que los asfaltos más rígidos suelen ser más frágiles, mientras que los menos rígidos son más dúctiles. La rigidez que miden los ensayos de *creep* y BBR no son capaces de caracterizar la capacidad de los asfaltos para alargarse hasta llegar a la ruptura. Para resolver este problema, los investigadores de SHRP diseñaron un aparato capaz de medir directamente la deformación a la falla a muy bajas temperaturas. Este equipo contiene dispositivos necesarios para medir las pequeñas deformaciones y el alto grado de precisión requerida en el ensayo.

La muestra de asfalto que se usa en este ensayo se asemeja a la forma de un hueso de perro, es estirada a una velocidad constante muy pequeña hasta que se fractura. Por medio de esta deformación, se calcula la deformación específica de la falla, que es un indicador del comportamiento, frágil o dúctil, a temperaturas bajas. La importancia de este ensayo es que define el momento en que sucede la fractura a la temperatura especificada.

Figura 12. **Ensayo de tracción directa**



Fuente: *Tracción directa*. <http://www.cenit-biosos.es/es/newsletter/2.html>. Consulta: 9 de octubre 2014.

1.6.3.1.5. Ensayo de película delgada en horno rotativo

Simula el envejecimiento del asfalto que ocurre en la planta durante la elaboración de mezclas de concreto asfáltico en caliente. Se caracteriza por el acto repetitivo del ligante al calor y flujo del aire. Una ventaja de este ensayo es que tarda sólo 85 minutos en realizarse. Está regido bajo las normas AASTHO

T179 y ASTM D1754. Algunas de las desventajas de este ensayo es que cuando se realiza con asfaltos modificados, suelen formar una capa superficial que obstruye el envejecimiento.

Algunos de los propósitos del ensayo de película delgada en horno rotatorio son: producir un cemento asfáltico oxidado que pueda usarse para ensayos adicionales y determinar los volátiles que pierde el asfalto durante el proceso del ensayo.

Figura 13. **Ensayo de película delgada en horno rotativo**



Fuente: Laboratorios Asfalgua.

1.6.3.1.6. Cámara de envejecimiento a presión

Su propósito es evaluar el envejecimiento del asfalto durante largos períodos de servicio. El residuo del ligante asfáltico es expuesto al calor y

presión después de que se ha realizado el ensayo de la película delgada en horno rotativo. Dependiendo del clima donde se vaya a construir el pavimento, así será la temperatura a utilizar en el ensayo, dicha temperatura oscila entre los 90 – 100 °C.

Figura 14. **Cámara de envejecimiento a presión**



Fuente: Instituto del Asfalto. *Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de Superpave*. p. 16.

2. ESPECIFICACIONES SUPERPAVE PARA LA CLASIFICACIÓN DE LIGANTES ASFÁLTICOS

En función del control de la deformación permanente, de la fisuración por bajas temperaturas y de la fisuración debido a la fatiga en los pavimentos asfálticos, surgieron nuevas especificaciones para ligantes asfálticos. Las nuevas especificaciones se logran controlando las distintas propiedades físicas medidas con los equipos descritos anteriormente. El objetivo es generar mapas del país con la zonificación donde se identifique el grado de desempeño requerido para que cumpla con las especificaciones de las temperaturas del pavimento y cargas de tránsito.

Tabla IV. Especificaciones Superpave para ligantes asfálticos

GRADO LIGANTE	PG 46				PG 52				PG 58				PG 64									
	-34	-40	-46	< 46	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40
Temperatura máxima de diseño del pavimento, promedio de 7 días, °C (a)	> -34	> -40	> -46	< 46	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -46	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40
Temperatura mínima de diseño del pavimento, °C (a)																						
ASFALTO ORIGINAL																						
Temperatura Flash Point, T48: Mínima °C	230																					
Viscosidad, ASTM D4402, (b) Módulo 3 Pa·s, Temperatura de ensayo, °C	135																					
Corte Dinámico, TP3; (c) G*sen (δ) Mínimo: 1.00 kPa, Temperatura de ensayo a 10 rad/s, °C	46				52				58				64									
HORNO DE PELÍCULA DELGADA ROTATORIA																						
Pérdida de masa, Máxima, %	1.00																					
Corte Dinámico, TP3; G*sen (δ) Máximo: 5000 kPa, Temperatura de ensayo a 10 rad/s, °C	46				52				58				64									
ENVEJECIMIENTO EN RECIPIENTE PRESURIZADO																						
Temperatura de Envejecimiento en PAV, °C (d)	90				100				100				100									
Corte Dinámico, TP3; G*sen (δ) Máximo: 5000 kPa, Temperatura de ensayo a 10 rad/s, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	16
Envejecimiento Físico (e)	INFORMAR																					
Módulo de Resilientes, TP1, (f) S mónico: 300 MPa, radiofrecuencia de m: 0.300 Temperatura de ensayo a 60 s, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	-30
Tensión directa, TP3; (f) Deformación de Rotura mínima: 1% Temperatura de ensayo a 1.0 mm/min, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	-30

NOTAS:

- (a) Las temperaturas del pavimento pueden ser calculadas partiendo de la temperatura del aire mediante un algoritmo incluido en el software SUPERPAVE™ o pueden ser provistas por el organismo vial de especificación, o siguiendo procedimientos tales como los detallados en PPG.
- (b) Esta exigencia puede ser obviada a discreción de la agencia de especificación si el proveedor garantiza que el ligante asfáltico puede ser adecuadamente bombeado y mezclado a temperaturas que cumplen todas las normas de seguridad.
- (c) Para el control de calidad en la producción de cemento asfáltico sin modificar, la medición de la viscosidad del cemento asfáltico original puede reemplazarse a las mediciones de corte dinámico [G*sen (δ)] a las temperaturas a las cuales el asfalto se comporta como un fluido Newtoniano. Cualquier ensayo normalizado adecuado de medición de viscosidad puede ser empleado, incluyendo viscosímetros capilares o rotacionales (AASHTO T210 o T202).
- (d) La temperatura de envejecimiento en PAV se basa en condiciones climáticas simuladas y es 90 °C, 100 °C o 110 °C. Para PG 58 y grados superiores la temperatura es de 100 °C, excepto en climas desérticos, para los cuales es 110 °C.
- (e) El endurecimiento físico - TP1 se ejecuta sobre un juego de vigas de asfalto de acuerdo a la sección 13.1 de TP1, con la salvedad de que el tiempo de acondicionamiento se extiende a 24 horas ± 10 minutos a 10 °C por encima de la mínima temperatura de performance. La rigidez y el valor de m se reportan solo por propósitos de información.
- (f) Si la rigidez es inferior a 300 MPa, en ensayo de tracción directa no es necesario. Si la rigidez en creep está entre 300 y 600 MPa, el requerimiento para la deformación específica en falla por tracción puede reemplazarse al requerimiento de la rigidez en creep. El valor de m debe cumplirse en ambos casos.

Fuente: Instituto del Asfalto. Antecedentes de los asfaltos de ensayo de ligantes asfálticos de Superpave. p. 74.

2.1. Deformación permanente

Esta forma de falla ocurre a altas temperaturas. La especificación define y establece requisitos para un factor de ahuellamiento (*rutting factor*), $G^* \sin(\delta)$, que representa el componente viscoso de la rigidez total del ligante a alta temperatura. Este factor se llama G^* sobre seno de δ , se calcula dividiendo el módulo complejo (G^*) por el seno del ángulo de fase (δ), ambos medidos utilizando el reómetro dinámico de corte. $G^*/\sin(\delta)$ debe ser como mínimo 1,00 kPa para el ligante asfáltico original (sin envejecimiento) y 2,20 kPa como mínimo para el residuo de horno rotatorio de película delgada (RTFO). Es lógico utilizar $G^*/\sin(\delta)$ para el análisis del comportamiento al ahuellamiento. $\sin(\delta)$ se calcula a partir del cociente entre la parte viscosa de G^* y el valor total de G^* ⁴.

Figura 15. Deformación permanente



Fuente: *Deformaciones*. www.espectador.com. Consulta: 15 de octubre de 2014.

⁴ Instituto del Asfalto. *Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de Superpave*. p. 59.

2.2. Deformación por fatiga

G^* y δ también se emplean en las especificaciones Superpave para ligantes asfálticos, para prevenir la fatiga en pavimentos asfálticos. Dado que la fatiga sucede a temperaturas del pavimento entre bajas y moderadas, luego de un lapso de servicio, la especificación exige que los ensayos de horno rotatorio de película delgada (RTFO) y vasija de envejecimiento a presión (PAV) se realicen antes de medir estas propiedades.

G^* y $\sin(\delta)$ son determinados utilizando el ensayo de corte dinámico. Sin embargo, en lugar de calcular el cociente de ambos parámetros (como sucedía para ahuellamiento) se calcula el producto. El factor de ahuellamiento por fatiga ($G^* \times \sin(\delta)$) se denomina G estrella seno de delta. La especificación Superpave para ligantes establece un valor máximo de 5000 kPa para el producto $G^* \times \sin(\delta)$ ⁵.

Figura 16. **Deformación por fatiga**



Fuente: San Juan Sacatepéquez, Guatemala.

⁵Instituto del Asfalto. *Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de Superpave*, p. 62.

2.3. Deformación por bajas temperaturas

Los ligantes se comportan como sólidos a muy bajas temperaturas (<-50 °C) y como líquidos a altas temperaturas (> 70 °C). Las temperaturas del pavimento asfáltico están habitualmente entre esos extremos. La viga de flexión es otra forma de definir si el comportamiento del ligante se parecerá más al de un sólido elástico o al de un líquido viscoso, pero a temperaturas mucho más bajas que las correspondientes a los ensayos con el reómetro de corte dinámico. El reómetro de viga de flexión aplica una pequeña carga de *creep* al espécimen de forma de viga, midiendo la rigidez a la fluencia (*creep stiffness*) de la pieza. Si la rigidez a la fluencia es muy alta, el asfalto tendrá un comportamiento frágil, y la probabilidad de agrietamiento será mayor. Por lo tanto, un límite máximo de 300 MPa se ha fijado para evitar este problema⁶.

En la especificación Superpave para ligantes, la velocidad con la cual cambia la rigidez del ligante con la carga de *creep* a bajas temperaturas, es controlada con el valor-m. Un alto valor-m es deseable, pues esto significa que a bajas temperaturas y al acumularse tensiones térmicas, la rigidez cambiará con relativa rapidez. Un cambio relativamente rápido en la rigidez implica que el ligante tenderá a disipar tensiones que de otro modo se acumularían hasta un punto en el que el agrietamiento por bajas temperaturas tendría lugar. La especificación Superpave para ligante asfálticos exige un mínimo de 0,300 para el valor-m.

A medida que la temperatura del pavimento disminuye, este se contrae. Esta contracción acumula tensiones en el pavimento. Cuando estas tensiones superan la resistencia del ligante, aparece la fisura. Estudios han demostrado

⁶Instituto del Asfalto. *Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de Superpave*. p. 64.

que si el ligante puede estirarse más del 1 % de su longitud inicial durante este fenómeno de contracción, hay menor posibilidad de agrietamiento. Por lo tanto, el ensayo de tracción directa se incluye en la especificación Superpave. Esta solo se aplica a ligantes con rigidez a fluencia entre 300 y 600 MPa. Si la rigidez a fluencia está por debajo de 300 MPa, no es necesario realizar el ensayo de tracción directa. En el ensayo se estira, muy despacio, una probeta de ligante, simulando la condición el pavimento a medida que ocurre la contracción⁷.

Figura 17. **Deformación por bajas temperaturas**



Fuente: San Juan Sacatepéquez, Guatemala.

⁷ ASPHALT INSTITUTE. Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SUPERPAVE. p. 64.

3. SELECCIÓN DEL LIGANTE ASFÁLTICO BASADO EN EL GRADO DE DESEMPEÑO (PG)

3.1. Grado de desempeño (PG)

La selección de los ligantes asfálticos debe ser seleccionada en función del clima. Superpave proporciona tres métodos para la elección de los ligantes asfálticos:

- Por área geométrica: un organismo vial elabora un mapa indicando el grado de ligante a ser utilizado por el proyectista, con base en el clima o a decisiones de política vial.
- Por la temperatura del pavimento: en este caso el proyectista necesita conocer la temperatura de diseño del pavimento.
- Por la temperatura del aire: el proyectista determina las temperaturas del aire para diseño, las que son convertidas en temperaturas de diseño del pavimento.

Tabla V. Grados actuales en la especificación Superpave

Altas temperaturas (°C) Intervalos de 6°C	Bajas Temperaturas (°C) Intervalos de 6°C	Temperaturas Promedio (°C) Intervalos de 3°C
PG 46	-34, -40 Y -46	10, 7 Y 4
PG 52	-10, -16, -22, -28, -34, -40 Y -46	25, 22, 19, 16, 13, 10 Y 7
PG 58	-16, -22, -28, -34 Y -40	25, 22, 19, 16, 13
PG 64	-10, -16, -22, -28, -34 Y -40	31, 28, 25, 22, 19, Y 16
PG 70	-10, -16, -22, -28, -34 Y -40	34, 31, 28, 25, 22, Y 19
PG 76	-10, -16, -22, -28, Y -34	37, 34, 31, 28, Y 25
PG 82	-10, -16, -22, -28, Y -34	40, 37, 34, 31, Y 28

Fuente: Instituto de Asfalto. *Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de Superpave*. p. 24.

3.2. Efectos de la velocidad de carga en la selección del ligante

El sistema Superpave determina que el ligante asfáltico debería tener mayor rigidez para los efectos de una menor velocidad en la aplicación de las cargas. Para solucionarlo, establece en su metodología que el grado de la temperatura alta debe incrementaron uno o dos grados, basado conjuntamente en el volumen de tráfico (ESAL, número de ejes equivalentes, por siglas en inglés) y la condición de velocidad de vehículo, definida como estacionaria, baja y estándar⁸.

Tabla VI. **Tabla para definir el aumento del PG para la temperatura máxima del pavimento**

Volumen de tránsito ESAL's (millones)	Condiciones de velocidad de vehículo		
	Estacionaria	Baja	Estándar
< 0.3	---	---	---
0.3 – 3	2	1	---
3 – 10	2	1	---
10 - 30	2	1	---
> 30	2	1	1

Fuente: Instituto del Asfalto. *Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de Superpave*. p. 45.

La guía de diseño de la AASHTO establece:

- Ecuación 3-1 para el cálculo del ESAL

$$ESAL_{\text{diseño}} = ESAL_{\text{/día}} * 365_{\text{días}} * LDF * DS * GF$$

⁸ BONILLA MIRANDA, Elías. *Determinación del tipo de cemento asfáltico según el grado de desempeño, de acuerdo con la zonificación climática y las cargas de tránsito del país*. p. 76.

Donde

ESAL_{/día}: número de ejes diarios de los vehículos totales

LDF: factor de distribución de carril (*land distribution factor*)

DS: distribución direccional (*directional split*)

GF: factor de crecimiento (*growth factor*)

El factor de crecimiento es una forma de predicción futura del tránsito, su determinación involucra factores como el crecimiento vehicular y cambios potenciales en las distribuciones vehiculares; se calcula con la ecuación 3-2⁹.

- Ecuación 3-2

$$GF = \frac{(1+r)^y - 1}{r}$$

Donde

r: razón de crecimiento anual del tránsito

y: total de años

- Para el cálculo de ESAL_{/día} se utiliza la ecuación 3-3.

$$ESAL_{/día} = TPDA * FC_{\text{tipo vehículo}} * \%_{\text{tipo vehículo}}$$

Donde

TPDA: es el tráfico promedio diario anual

FC: factor de camión de cada vehículo

⁹ BONILLA MIRANDA, Elías. *Determinación del tipo de cemento asfáltico según el grado de desempeño, de acuerdo con la zonificación climática y las cargas de tránsito del país.* p. 77.

La condición de la velocidad depende principalmente de la pendiente del terreno sobre el cual yace la ruta, ya que basado en este factor se define el diseño geométrico de la ruta que, a su vez, define la velocidad de operación de los vehículos, por esta razón se debe considerar la pendiente del terreno ¹⁰.

3.3. Temperatura del aire

El factor con mayor correlación respecto a la temperatura del pavimento es la temperatura del aire y es la variable que tiene mayor peso en los modelos de estimación de la temperatura del pavimento; fue demostrado en investigaciones realizadas por los modelos SHRP y LTPP. La variable se ve afectada por la cobertura vegetal, nubosidad y la radiación solar. Trabajos llevados a cabo en el medio oriente dieron a conocer que la implementación del sistema Superpave permite disminuir la susceptibilidad a la deformación permanente del pavimento.

Superpave establece que para calcular la temperatura máxima, mínima y promedio del pavimento, se tiene que utilizar las bases de datos de temperaturas del aire de las estaciones meteorológicas. Para obtener la temperatura máxima del aire, se debe calcular, para cada año de registro de la estación meteorológica, los siete días consecutivos más calientes de cada año y su promedio. En el caso de la temperatura mínima del aire, se escoge la menor temperatura de cada año de registro. Tanto para la temperatura máxima y mínima del aire, se debe calcular el promedio y la desviación estándar para todos los años de registro ¹¹.

¹⁰ BONILLA MIRANDA, Elías. *Determinación del tipo de cemento asfáltico según el grado de desempeño, de acuerdo con la zonificación climática y las cargas de tránsito del país.* p. 77.

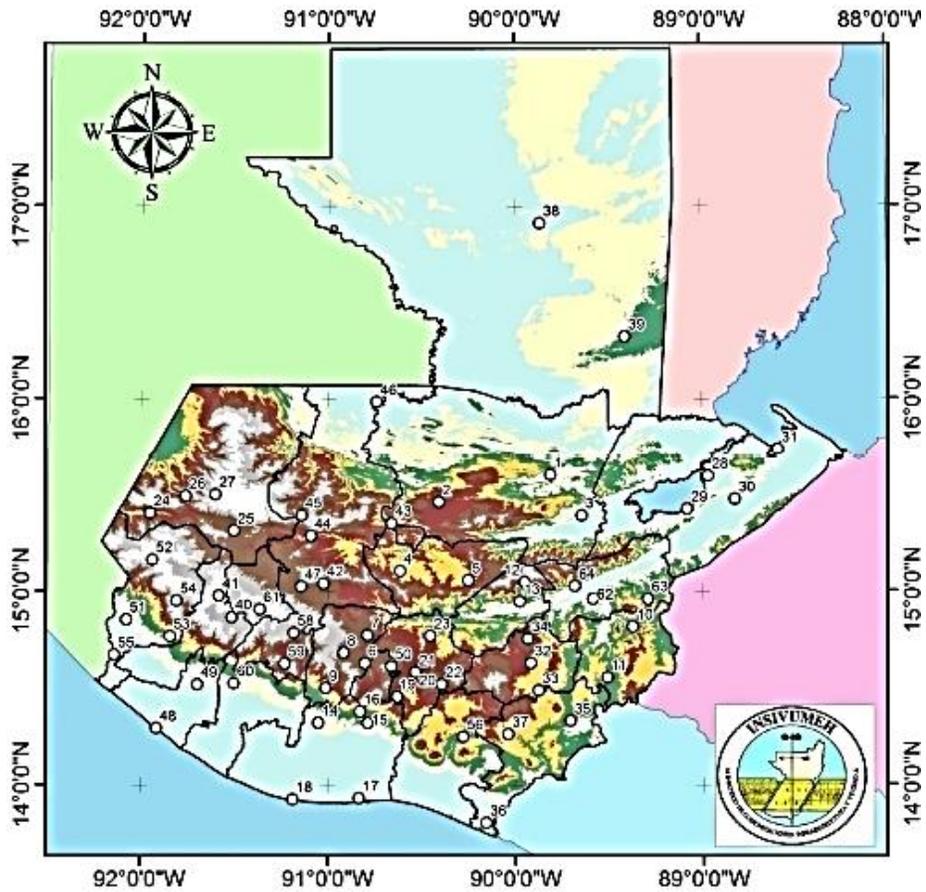
¹¹ Op. Cit. p. 80.

3.4. Base de datos climáticos

Superpave contiene una base de datos muy grande, con más de 6 500 estaciones meteorológicas, y para el cálculo solo se consideran las estaciones con 20 o más años de registro diarios de la temperatura del aire. Para realizar este estudio, se obtuvieron los datos de las temperaturas provenientes del Insivumeh. Para la selección de las estaciones fue necesario basarse en las siguientes características:

- Registros actuales completos correspondientes a un período de 5 años. Se solicitaron al Insivumeh los datos diarios de los últimos 5 años de las estaciones meteorológicas activas y completas del país.
- Localización dispersa de las estaciones sobre el territorio nacional. Con los datos obtenidos del Insivumeh, se logró abarcar gran parte del territorio nacional; esto garantiza una buena zonificación climática del pavimento para el estudio.
- Altura variada de las estaciones meteorológicas. Es de mucha importancia obtener todos los rangos posibles de alturas de las estaciones meteorológicas, para lograr abarcar cualquier altura que podría experimentar una carretera en el país. En Guatemala se obtuvieron alturas desde 0 hasta 2 460 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). En el siguiente mapa se muestran las estaciones meteorológicas y el departamento al que pertenecen. En la tabla VII se especifica cada una de ellas.

Figura 18. **Mapa de estaciones meteorológicas de Guatemala**



Fuente: Insivumeh.

Tabla VII. **Estaciones meteorológicas de Guatemala**

Núm.	Departamento	Estación
1	Alta Verapaz	Santa María Cahabón
2		Cobán
3		Panzós
4	Baja Verapaz	Cubulco
5		San Jerónimo
6	Chimaltenango	Alameda ICTA
7		San Martín Jilotepeque

Continuación de la tabla VII.

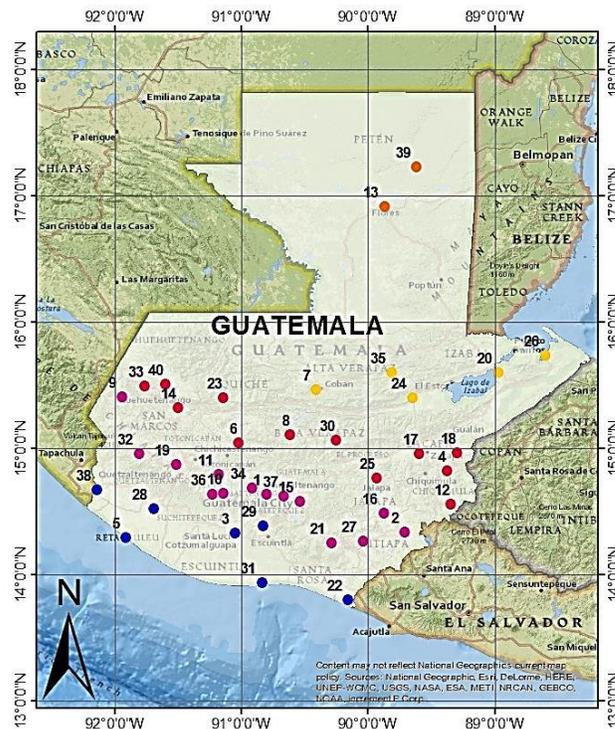
8		Santa Cruz Balanyá
9		Santa Margarita
10	Chiquimula	Camotán
11		Esquipulas
12	El Progreso	Los Albores
13		San Agustín Acasaguastlán
14	Escuintla	Camantulul
15		Concepción
16		Sabana Grande
17		San José
18		Sipacate
19	Guatemala	Amatitlán
20		INSIVUMEH
21		La Aurora
22		San José Pinula
23		San Pedro Ayampuc
24		Cuilco
25	Huehuetenango	Huehuetenango
26		San Pedro Necta
27		Todos Santos
28	Izabal	Las Vegas
29		Mariscos
30		Morales
31		Puerto Barrios
32	Jalapa	Jalapa
33		La Ceibita
34		Potrero Carrillo
35	Jutiapa	Asunción Mita
36		Montufar
37		Quezada
38	Petén	Flores
39		Poptún
40	Quetzaltenango	Labor Ovalle
41		Pachuté
42	Quiché	Chiniqué
43		Chixoy Quiché
44		Chuitinamit
45		Nebaj
46		Playa Grande
47		Santa Cruz del Quiché
48	Retalhuleu	Champerico
49		Retalhuleu
50	San Marcos	Suiza Contenta
51		Catarina
52		Ixchigua
53		La Reforma
54		San Marcos
55		Tecún Umán
56	Santa Rosa	Los Esclavos

Continuación de la tabla VII.

57	Sololá	El Capitán
58		Santa María El Tablón
59		Santiago Atitlán
60	Suchitepéquez	Mazatenango
61	Totonicapán	Totonicapán
62	Zacapa	La Fragua
63		La Unión
64		Pasabien

Fuente: Insivumeh.

Figura 19. Mapa de estaciones meteorológicas de Guatemala utilizadas en la investigación



Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, elaborado por el Ing. Jairo Sanabria Sandino.

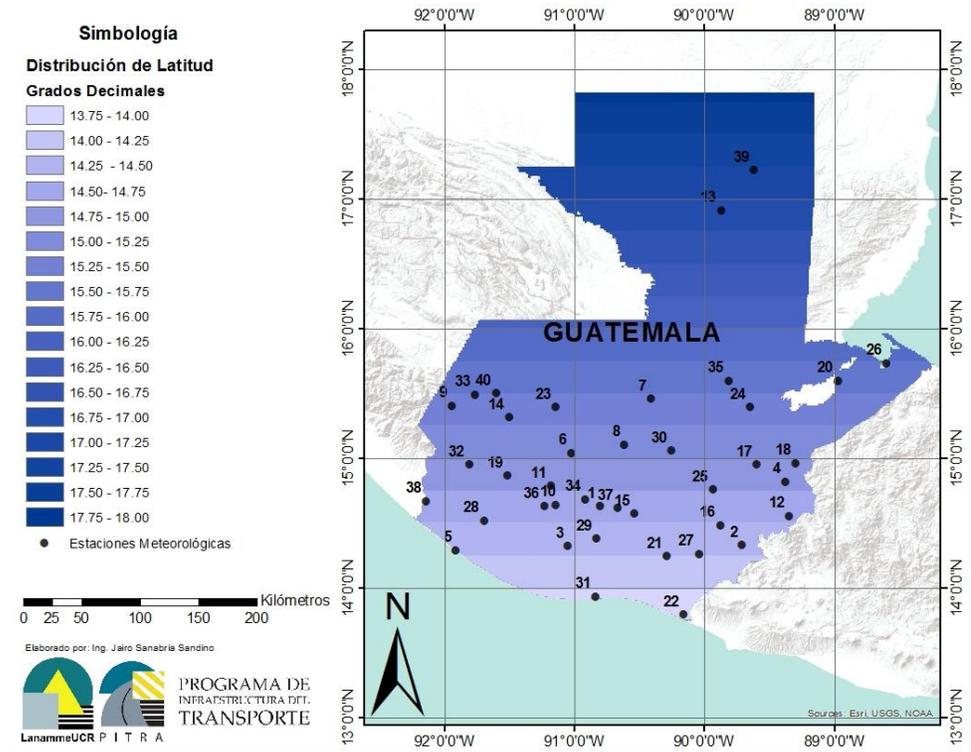
Tabla VIII. Estaciones meteorológicas de Guatemala utilizadas

Núm.	ESTACIÓN METEREOLÓGICA	INSTITUCIÓN	ELEVACIÓN (m.s.n.m.)	LATITUD (NORTE)	LONGITUD (OESTE)	REGISTRO (AÑOS)
1	ALAMEDA ICTA	INSIVUMEH	1766	14.63380	-90.80330	2009-2013
2	ASUNCIÓN MITA R.H.	INSIVUMEH	478	14.33440	-89.70580	2009-2013
3	CAMANTULUL	INSIVUMEH	280	14.32500	-91.05080	2009-2013
4	CAMOTÁN	INSIVUMEH	450	14.82050	-89.37270	2009-2013
5	CHAMPERICO FEGUA	INSIVUMEH	5	14.29440	-91.91380	2009-2013
6	CHINIQUE	INSIVUMEH	1880	15.04380	-91.02440	2009-2013
7	COBÁN	INSIVUMEH	1323	15.46013	-90.41047	2009-2013
8	CUBULCO	INSIVUMEH	994	15.10880	-90.61410	2009-2013
9	CUILCO	INSIVUMEH	1120	15.40630	-91.94610	2009-2013
10	EL CAPITÁN	INSIVUMEH	1562	14.64300	-91.14050	2009-2013
11	EL TABLON	INSIVUMEH	2392	14.79020	-91.18190	2009-2013
12	ESQUIPULAS	INSIVUMEH	950	14.55880	-89.34190	2009-2013
13	FLORES AEROPUERTO	INSIVUMEH	123	16.91613	-89.86686	2009-2013
14	HUEHUTENANGO	INSIVUMEH	1870	15.31720	-91.50300	2009-2013
15	INSIVUMEH	INSIVUMEH	1502	14.57739	-90.53722	2009-2013
16	LA CEIBITA	INSIVUMEH	960	14.48507	-89.87498	2009-2013
17	LA FRAGUA	INSIVUMEH	210	14.95547	-89.59160	2009-2013
18	LA UNIÓN	INSIVUMEH	1000	14.96330	-89.29110	2009-2013
19	LABOR OVALLE	INSIVUMEH	2380	14.87000	-91.51380	2009-2013
20	LAS VEGAS PHC	INSIVUMEH	10	15.60000	-88.96660	2009-2013
21	LOS ESCLAVOS	INSIVUMEH	737	14.24556	-90.28363	2009-2013
22	MONTUFAR	INSIVUMEH	15	13.79675	-90.15442	2009-2013
23	NEBAJ	INSIVUMEH	1906	15.39800	-91.14220	2009-2013
24	PANZOS PHC ALTA VERAPAZ	INSIVUMEH	30	15.39720	-89.64380	2009-2013
25	POTRERO CARRILLO	INSIVUMEH	1760	14.76050	-89.93220	2009-2013
26	PUERTO BARRIOS PHC	INSIVUMEH	2	15.73770	-88.59160	2009-2013
27	QUEZADA	INSIVUMEH	980	14.26610	-90.03770	2009-2013
28	RETALHULEU AEROPUERTO	INSIVUMEH	205	14.52190	-91.69580	2009-2013
29	SABANA GRANDE	INSIVUMEH	730	14.38270	-90.82910	2009-2013
30	SAN JERONIMO RH	INSIVUMEH	1000	15.06110	-90.25000	2009-2013
31	SAN JOSE AEROPUERTO	INSIVUMEH	6	13.93610	-90.83440	2009-2013
32	SAN MARCOS PHC	INSIVUMEH	2420	14.95410	-91.80940	2009-2013
33	SAN PEDRO NECTA	INSIVUMEH	1700	15.49520	-91.76330	2009-2013
34	SANTA CRUZ BALANYA	INSIVUMEH	2080	14.68660	-90.91520	2009-2013
35	SANTA MARIA CAHABÓN	INSIVUMEH	380	15.60000	-89.81000	2009-2013
36	SANTIAGO ATITLÁN	INSIVUMEH	1580	14.63160	-91.23130	2009-2013
37	SUIZA CONTENTA	INSIVUMEH	2105	14.61880	-90.66110	2009-2013
38	TECÚN UMAN FEGUA	INSIVUMEH	28	14.67360	-92.13940	2009-2013
39	TIKAL PETEN	INSIVUMEH	230	17.22437	-89.61157	2009-2013
40	TODOS SANTOS	INSIVUMEH	2460	15.50470	-91.60360	2009-2013

Fuente: Insivumeh.

Para obtener la temperatura del pavimento por los diferentes sistemas, se necesitan los valores de latitud de las estaciones meteorológicas. El mapa siguiente muestra una distribución espacial de las estaciones de acuerdo a su latitud.

Figura 20. Valores de latitud en Guatemala



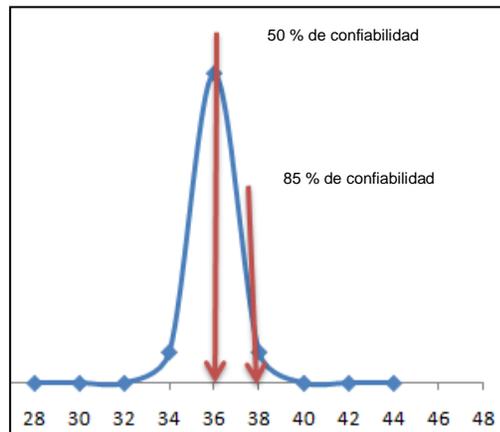
Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, elaborado por el Ing. Jairo Sanabria Sandino.

3.5. Confiabilidad

El sistema de Superpave adiciona un porcentaje de confiabilidad a las temperaturas obtenidas del aire, con el propósito que el diseñador defina el porcentaje de probabilidad para un año dado, en el cual la temperatura real no exceda la temperatura de diseño. Esta confiabilidad se aplicará utilizando una desviación normal estándar para las temperaturas. Si la persona que realiza el diseño selecciona una confiabilidad del 50 % obtendrá un 50 % de probabilidad de que la temperatura real supere los 36 °C. En cambio, si selecciona un

porcentaje de confianza de 85 % obtendrá solo un 2 % de probabilidad de que la temperatura de diseño se vea superada.

Figura 21. **Confiabilidad según el porcentaje**



Fuente: elaboración propia.

El uso de la confiabilidad en las temperaturas del aire según Superpave depende de la importancia del estado de la red vial, las cargas del tránsito, el costo y disponibilidad del ligante asfáltico a utilizar. Una característica observada en el uso de la confiabilidad en los países donde se han desarrollado mapas de grado de desempeño, es que no tienden a caracterizar el tránsito de su país y al no hacerlo asignan un valor de confiabilidad de un 98 %. Esto repercute significativamente, ya que el mapa de diseño para seleccionar el ligante asfáltico se vuelve muy conservador y pierde flexibilidad a la hora de seleccionar un ligante asfáltico más económico, en zonas que tal vez dentro de sus requerimientos no necesitan de un asfalto con un PG muy alto¹².

¹² BONILLA MIRANDA, Elías. *Determinación del tipo de cemento asfáltico según el grado de desempeño, de acuerdo con la zonificación climática y las cargas de tránsito del país.* p. 86.

Basado en lo anterior y en el criterio técnico del Ing. Fabián Elizondo (Lanamme – UCR), en este estudio se recomienda el uso de una confiabilidad asociada a los valores de un 50 y 85 por ciento.

Tabla IX. **Valores de desviación estándar según el porcentaje de confiabilidad**

Confiabilidad (%)	Desviación normal estándar (Z)
50	0
85	1,037

Fuente: elaboración propia.

Para los cálculos de los valores de la distribución normal estándar se utilizó la siguiente ecuación:

- Ecuación 3-4

$$X = \bar{X} \pm Z * \sigma$$

Donde,

Z: desviación normal estándar

\bar{X} : valor promedio de la variable

σ : valor de la desviación estándar del conjunto de datos

X: valor que se desea conocer de la confiabilidad

3.6. Obtención de las temperaturas del aire a diferentes niveles de confiabilidad

Para obtener las temperaturas máximas, mínimas y promedio, se tiene que basar en la información de las 40 estaciones meteorológicas. Se necesita usar un programa como Excel para ordenar y calcular los datos que se obtengan como promedios, desviación estándar, entre otros. Se debe definir el valor de la temperatura del aire máxima, mínima y promedio basado en el grado de confiabilidad de 50 y 85 porciento.

- Temperaturas máximas del aire: Superpave define la temperatura máxima del aire como los siete días más calientes. Su obtención consiste en calcular, para cada año de operación de la estación meteorológica, los siete días consecutivos más calientes y obtener su promedio. Aquí se implementa el uso de la media móvil, ya que, con los datos ordenados consecutivamente por día, se procede a obtener promedios de temperatura máxima del aire en subgrupos de siete días, así como promedio mayor de los subconjuntos de siete días, que se obtienen de un año de operación del promedio máximo de temperatura de aire (los siete días más calientes). La siguiente ecuación describe cómo obtener la temperatura máxima según Superpave¹³.

- Ecuación 3-5

$$\text{Temperatura máxima del aire}_i = \frac{\sum_{i=1}^{i+6} T_i}{7} = \frac{T_i + T_{i+1} + T_{i+2} + T_{i+3} + T_{i+4} + T_{i+5} + T_{i+6}}{7}$$

¹³ BONILLA MIRANDA, Elías. *Determinación del tipo de cemento asfáltico según el grado de desempeño, de acuerdo con la zonificación climática y las cargas de tránsito del país.* p. 88.

Donde

Temperatura máxima del aire; serie sobre la cual se obtiene el promedio de los siete días consecutivos de temperatura.

T_i : registro diario de temperatura máximo de la estación meteorológica.

Sumando a lo anterior, se debe calcular la desviación estándar de los siete días más calientes (σ) con la siguiente ecuación:

o Ecuación 3-6

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{T} - T)^2}{n-1}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(\bar{T} - T_1)^2 + (\bar{T} - T_2)^2 + (\bar{T} - T_3)^2 + (\bar{T} - T_4)^2 + (\bar{T} - T_5)^2 + (\bar{T} - T_6)^2 + (\bar{T} - T_7)^2}{6}}$$

Donde

T_i : registro diario individual de los siete días más calientes del año.

N: registro total de registros diarios a considerar, en este caso son 7.

\bar{T} : mayor de los promedios obtenidos de la ecuación 3-5.

- Temperaturas mínima y promedio del aire: en el caso de estas dos temperaturas, Superpave establece una metodología más simple, la cual consiste en calcular la temperatura promedio y la mínima de cada año de operación de la estación meteorológica y la desviación estándar para todos los años de registro, de la temperatura promedio y mínima del aire de las estaciones meteorológicas consideradas. La siguiente ecuación

muestra la forma en que se obtiene el promedio y la desviación estándar respectivamente¹⁴.

- Ecuación 3-7

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}$$

Donde

\bar{T} : temperatura promedio, ya sea de la base de datos de temperatura promedio o mínima del aire.

$\sum_{i=1}^n T_i$: sumatoria de todos los registros de temperaturas de la base de datos.

n: número total de registros de la base de datos.

- Ecuación 3-8

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{T} - T_i)^2}{n-1}}$$

Donde

T_i : registro diario individual de la base de datos de la estación meteorológica.

n: número total de registros de la base de datos.

\bar{T} : temperatura promedio, obtenida como se describe en la ecuación 3-7.

A continuación se presenta una serie de cuadros con las temperaturas máximas obtenidas de las estaciones meteorológicas que fueron utilizadas para

¹⁴ BONILLA MIRANDA, Elías. *Determinación del tipo de cemento asfáltico según el grado de desempeño, de acuerdo con la zonificación climática y las cargas de tránsito del país.* p. 89.

realizar el estudio, mediante el procedimiento descrito anteriormente. También se incluye las temperaturas obtenidas en niveles diferentes.

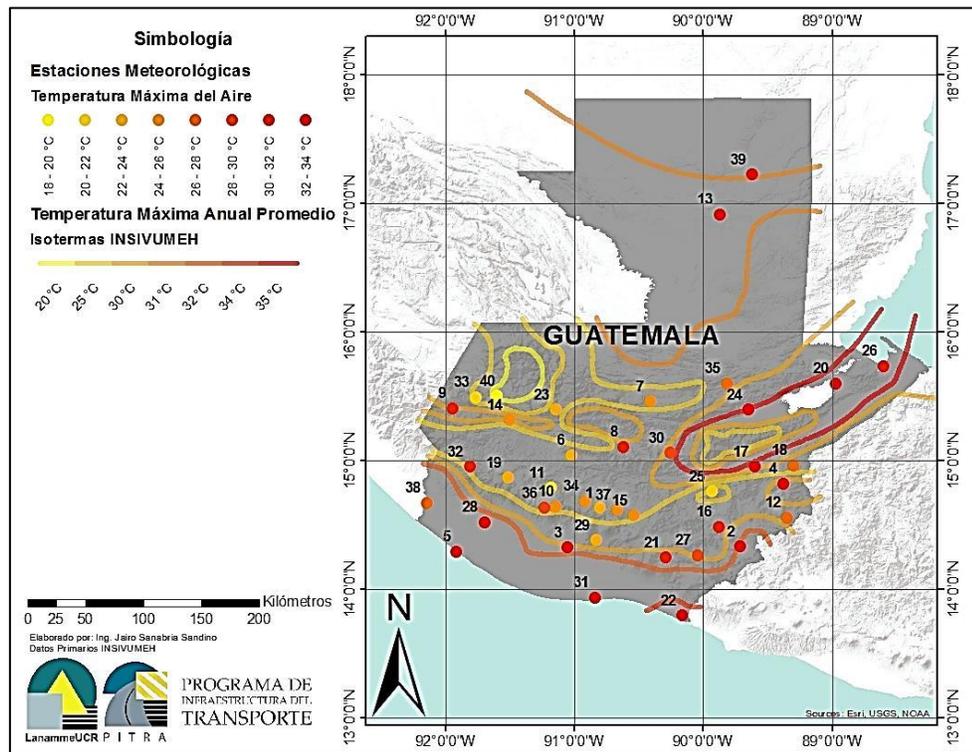
Tabla X. **Temperaturas máximas del aire de las estaciones meteorológicas**

Núm.	ESTACIÓN METEREOLÓGICA	TEMP. MAX AIRE	DESV. EST. 7 DÍAS	CONF. 50 %	CONF. 85 %
1	ALAMEDA ICTA	23,72	0,27	23,72	24,00
2	ASUNCIÓN MITA R.H.	33,34	0,24	33,34	33,60
3	CAMANTULUL	32,44	0,18	32,44	32,63
4	CAMOTÁN	32,17	0,52	32,17	32,71
5	CHAMPERICO FEGUA	32,96	0,20	32,96	33,17
6	CHINIQUE	23,52	0,70	23,52	24,25
7	COBÁN	25,60	0,39	25,60	26,00
8	CUBULCO	30,25	0,82	30,25	31,10
9	CUILCO	30,39	0,42	30,39	30,82
10	EL CAPITÁN	25,14	0,40	25,14	25,55
11	EL TABLON	20,91	0,45	20,91	21,37
12	ESQUIPULAS	27,14	0,62	27,14	27,78
13	FLORES AEROPUERTO	32,53	0,51	32,53	33,06
14	HUEHUETENANGO	25,87	0,69	25,87	26,58
15	INSIVUMEH	25,64	0,29	25,64	25,94
16	LA CEIBITA	30,14	0,31	30,14	30,46
17	LA FRAGUA	33,89	0,69	33,89	34,61
18	LA UNIÓN	27,13	0,47	27,13	27,62
19	LABOR OVALLE	22,49	0,48	22,49	22,99
20	LAS VEGAS PHC	32,28	0,70	32,28	33,01
21	LOS ESCLAVOS	30,99	0,34	30,99	31,35
22	MONTÚFAR	33,74	0,19	33,74	33,93
23	NEBAJ	23,00	0,70	23,00	23,73
24	PANZÓS PHC ALTA VERAPAZ	32,41	0,27	32,41	32,68
25	POTRERO CARRILLO	21,89	0,68	21,89	22,60
26	PUERTO BARRIOS PHC	30,19	0,46	30,19	30,66
27	QUEZADA	29,13	0,31	29,13	29,46
28	RETALHULEU AEROPUERTO	33,48	0,27	33,48	33,76
29	SÁBANA GRANDE	23,22	0,28	23,22	23,52
30	SAN JERÓNIMO RH	29,29	0,74	29,29	30,06
31	SAN JOSÉ AEROPUERTO	32,87	0,46	32,87	33,34
32	SAN MARCOS PHC	30,22	0,39	30,22	30,63
33	SAN PEDRO NECTA	21,63	0,34	21,63	21,98
34	SANTA CRUZ BALANYÁ	24,10	0,52	24,10	24,63
35	SANTA MARÍA CAHABÓN	26,18	0,40	26,18	26,60
36	SANTIAGO ATITLÁN	29,52	0,44	29,52	29,98
37	SUIZA CONTENTA	24,14	0,64	24,14	24,81
38	TECÚN UMÁN FEGUA	27,00	0,34	27,00	27,35
39	TIKAL PETÉN	32,66	0,47	32,66	33,15
40	TODOS SANTOS	18,79	0,67	18,79	19,48

Fuente: elaboración propia.

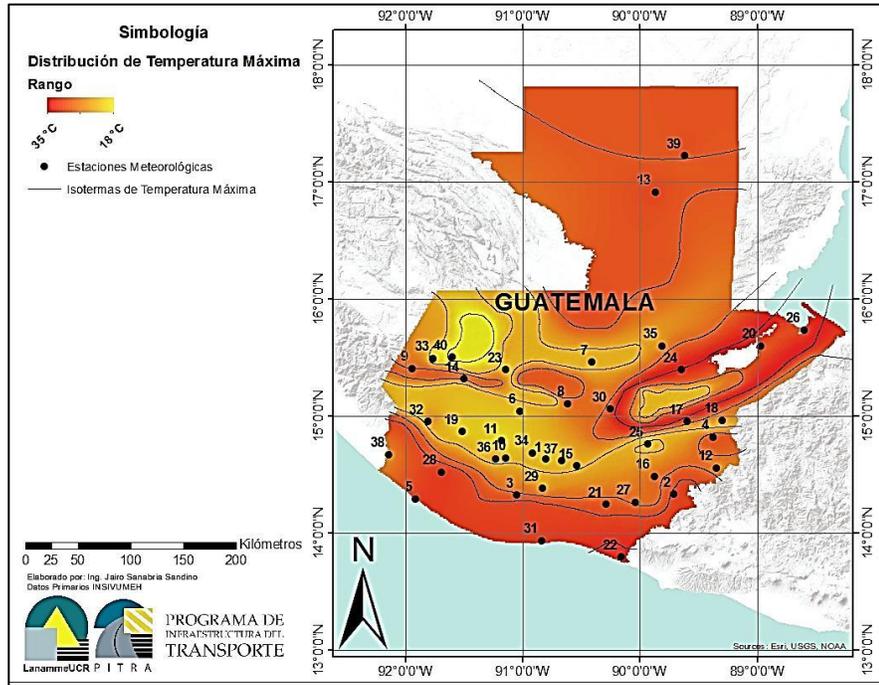
Obtenidos los resultados de las temperaturas máximas del aire, se procede a generar un mapa con isotermas de distribución de la temperatura máxima del aire para el análisis de los métodos SHRP y LTPP.

Figura 22. Temperatura máxima del aire



Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, elaborado por el Ing. Jairo Sanabria Sandino.

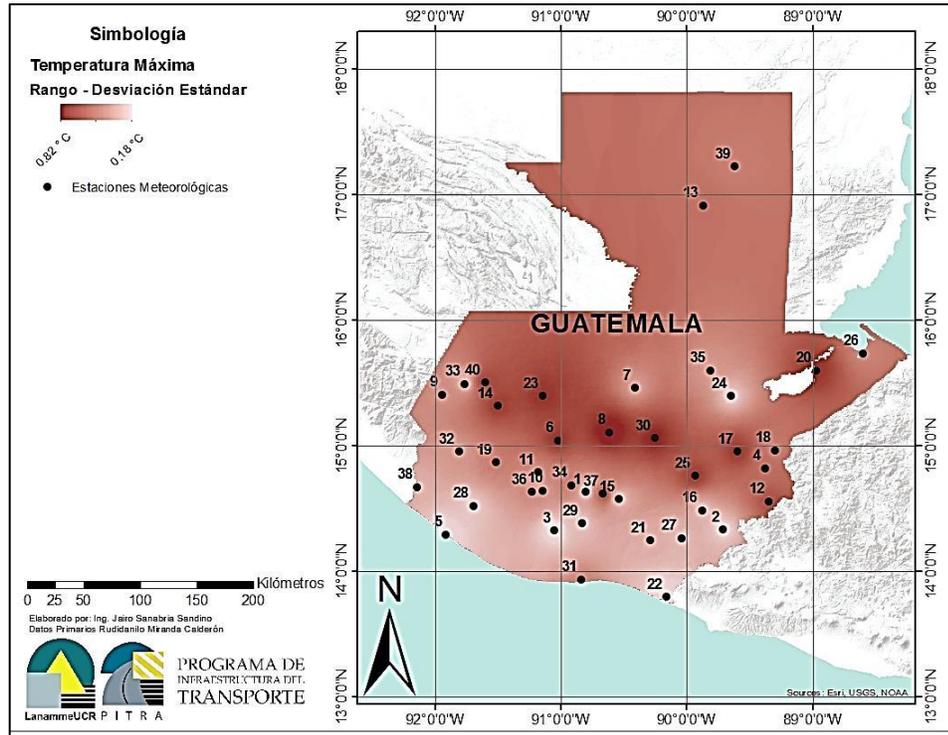
Figura 23. **Distribución de la temperatura máxima**



Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, elaborado por el Ing. Jairo Sanabria Sandino.

El siguiente mapa muestra el resultado de los cálculos de los valores de la distribución de la desviación estándar de las estaciones analizadas para las temperaturas máximas del aire.

Figura 24. **Distribución de la desviación estándar de las estaciones meteorológicas - temperatura máxima del aire**



Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, elaborado por el Ing. Jairo Sanabria Sandino.

Tabla XI. **Temperaturas promedio del aire de las estaciones meteorológicas**

Núm.	ESTACIÓN METEOROLÓGICA	TEMP. PROM. AIRE	DES. EST. 7 DÍAS	CONF. 50 %	CONF. 85 %
1	ALAMEDA ICTA	18,28	1,74	18,28	16,48
2	ASUNCIÓN MITA R.H.	27,27	1,71	27,27	25,50
3	CAMANTULUL	25,35	1,27	25,35	24,03
4	CAMOTÁN	25,98	2,32	25,98	23,57
5	CHAMPERICO FEGUA	28,33	1,49	28,33	26,78
6	CHINIQUE	15,54	1,63	15,54	13,85
7	COBÁN	19,79	2,60	19,79	17,09
8	CUBULCO	23,17	2,23	23,17	20,86
9	CUILCO	23,51	2,21	23,51	21,22

Continuación de la tabla XI.

10	EL CAPITÁN	19,06	1,21	19,06	17,81
11	EL TABLÓN	14,74	1,58	14,74	13,10
12	ESQUIPULAS	21,95	2,37	21,95	19,49
13	FLORES AEROPUERTO	26,64	2,8	26,6	23,8
14	HUEHUETENANGO	18,62	1,97	18,62	16,58
15	INSIVUMEH	19,92	1,70	19,92	18,16
16	LA CEIBITA	23,69	1,94	23,69	21,68
17	LA FRAGUA	27,97	2,48	27,97	25,40
18	LA UNIÓN	22,62	2,85	22,62	19,66
19	LABOR OVALLE	14,85	1,69	14,85	13,10
20	LAS VEGAS PHC	27,83	2,52	27,83	25,22
21	LOS ESCLAVOS	24,65	1,30	24,65	23,30
22	MONTUFAR	28,90	1,24	28,90	27,61
23	NEBAJ	16,72	2,44	16,72	14,19
24	PANZÓS PHC ALTA VERAPAZ	27,35	2,37	27,35	24,89
25	POTRERO CARRILLO	16,84	2,19	16,84	14,57
26	PUERTO BARRIOS PHC	26,49	2,36	26,49	24,05
27	QUEZADA	23,07	1,50	23,07	21,52
28	RETALHULEU AEROPUERTO	27,36	1,21	27,36	26,10
29	SABANA GRANDE	24,54	1,49	24,54	22,99
30	SAN JERÓNIMO RH	22,02	1,92	22,02	20,02
31	SAN JOSE AEROPUERTO	27,87	1,27	27,87	26,55
32	SAN MARCOS PHC	13,82	1,35	13,82	12,42
33	SAN PEDRO NECTA	18,77	2,20	18,77	16,49
34	SANTA CRUZ BALANYÁ	16,40	1,65	16,40	14,69
35	SANTA MARIA CAHABÓN	26,17	2,60	26,17	23,47
36	SANTIAGO ATITLÁN	19,06	1,40	19,06	17,61
37	SUIZA CONTENTA	16,56	1,45	16,56	15,06
38	TECÚN UMAN FEGUA	28,49	1,39	28,49	27,06
39	TIKAL PETÉN	25,60	3,11	25,60	22,38
40	TODOS SANTOS	13,85	1,79	13,85	11,99

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Temperaturas mínimas del aire de las estaciones meteorológicas**

Núm.	ESTACIÓN METEOROLÓGICA	TEMP. MIN AIRE	DESV. EST. 7 DÍAS	CONF 50 %	CONF 85 %
1	ALAMEDA ICTA	11,00	3,13	11,00	7,75
2	ASUNCIÓN MITA R.H.	21,29	1,66	21,29	19,57
3	CAMANTULUL	20,71	1,80	20,71	18,84
4	CAMOTÁN	20,78	2,28	20,78	18,42
5	CHAMPERICO FEGUA	23,56	1,87	23,56	21,62
6	CHINIQUE	9,82	2,70	9,82	7,02
7	COBÁN	13,67	2,82	13,67	10,75
8	CUBULCO	15,19	3,24	15,19	11,83
9	CUILCO	15,85	2,85	15,85	12,89
10	EL CAPITÁN	13,48	1,96	13,48	11,45
11	EL TABLÓN	9,41	2,75	9,41	6,56

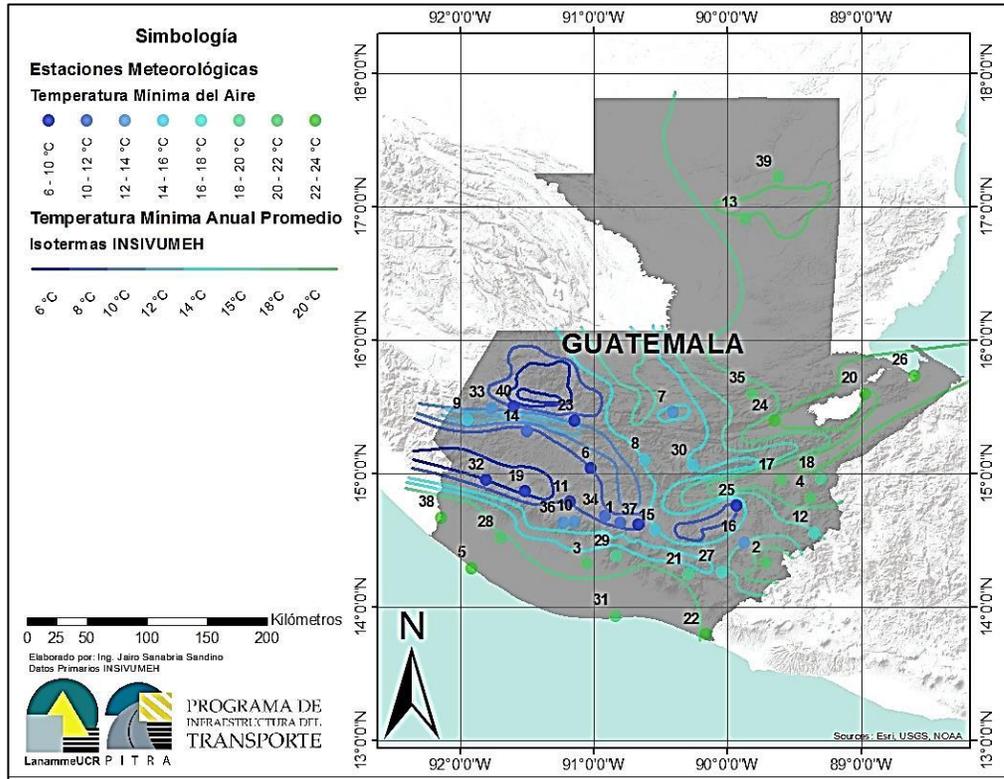
Continuación de la tabla XIII.

12	ESQUIPULAS	17,77	2,13	17,77	15,56
13	FLORES AEROPUERTO	20,53	2,70	20,53	17,73
14	HUEHUETENANGO	11,20	3,60	11,20	7,47
15	INSIVUMEH	15,53	1,97	15,53	13,49
16	LA CEIBITA	13,85	3,48	13,85	10,24
17	LA FRAGUA	21,45	2,44	21,45	18,92
18	LA UNIÓN	18,33	2,62	18,33	15,61
19	LABOR OVALLE	7,78	4,25	7,78	3,37
20	LAS VEGAS PHC	22,09	2,31	22,09	19,69
21	LOS ESCLAVOS	18,40	2,58	18,40	15,72
22	MONTÚFAR	23,67	1,54	23,67	22,07
23	NEBAJ	9,69	5,00	9,69	4,51
24	PANZÓS PHC ALTA VERAPAZ	22,46	2,18	22,46	20,20
25	POTRERO CARRILLO	9,49	4,41	9,49	4,92
26	PUERTO BARRIOS PHC	22,13	2,14	22,13	19,91
27	QUEZADA	16,31	2,19	16,31	14,04
28	RETALHULEU AEROPUERTO	21,50	1,13	21,50	20,33
29	SÁBANA GRANDE	18,64	2,25	18,64	16,30
30	SAN JERÓNIMO RH	14,50	3,01	14,50	11,39
31	SAN JOSÉ AEROPUERTO	21,96	2,07	21,96	19,81
32	SAN MARCOS PHC	6,75	2,31	6,75	4,36
33	SAN PEDRO NECTA	13,39	2,15	13,39	11,15
34	SANTA CRUZ BALANYÁ	10,30	2,61	10,30	7,59
35	SANTA MARÍA CAHABÓN	20,27	2,34	20,27	17,85
36	SANTIAGO ATITLÁN	12,29	2,85	12,29	9,34
37	SUIZA CONTENTA	9,13	2,80	9,13	6,22
38	TECÚN UMÁN FEGUA	22,16	1,50	22,16	20,60
39	TIKAL PETÉN	20,29	3,38	20,29	16,78
40	TODOS SANTOS	7,60	2,37	7,60	5,14

Fuente: elaboración propia.

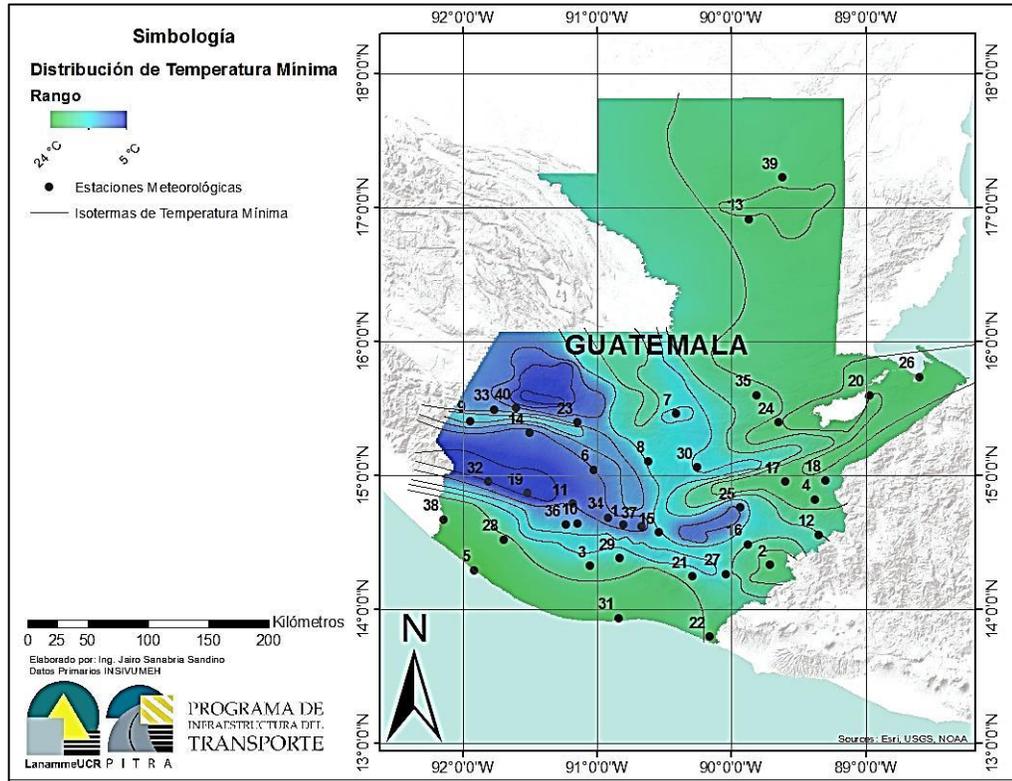
Con los datos de las estaciones meteorológicas se procede a calcular el valor de las isotermas por medio de las temperaturas mínimas de aire, las cuales se muestran en la siguiente figura.

Figura 25. Temperatura mínima del aire



Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, elaborado por el Ing. Jairo Sanabria Sandino.

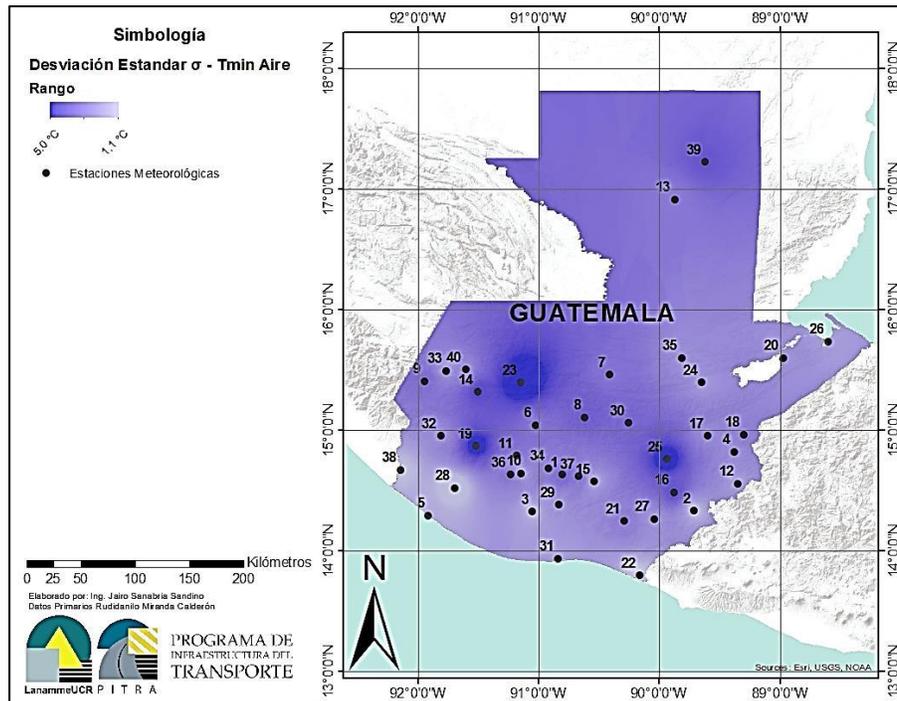
Figura 26. Distribución de la temperatura mínima



Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, elaborado por el Ing. Jairo Sanabria Sandino.

El mapa siguiente muestra el resultado de los cálculos de los valores de la distribución de la desviación estándar de las estaciones analizadas para las temperaturas mínimas del aire.

Figura 27. **Distribución de la desviación estándar de las estaciones meteorológicas - temperatura mínimas del aire**



Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, elaborado por el Ing. Jairo Sanabria Sandino.

Con los resultados de las temperaturas máximas, mínimas y promedios de cada estación meteorológica con su nivel de confiabilidad, se procede al cálculo de la temperatura del pavimento con los modelos SHRP y LTPP.

4. MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA TEMPERATURA DEL PAVIMENTO

A partir de la temperatura máxima y mínima del pavimento se puede proceder a definir el grado de desempeño (PG). Cuando Superpave empezó a realizar investigación para clasificar por grado de desempeño, desarrolló modelos para estimar la temperatura máxima y mínima del pavimento, basado en la temperatura del aire y la localización geográfica.

El SHRP fue uno de los modelos desarrollados por Superpave, el cual selecciona el ligante asfáltico calculando la temperatura máxima del pavimento, a partir de los siete días más calientes de la temperatura máxima del aire, y la temperatura mínima del pavimento, a partir de la temperatura mínima del aire.

Con el establecimiento del LTPP y el SMP se creó una nueva base de datos de registros de temperatura diarias del aire y del pavimento, a partir de estaciones de registro localizadas en todo el territorio estadounidense, que permitió el desarrollo y validación de nuevos modelos LTPP para la predicción de la temperatura del pavimento, además de permitir cuantificar la diferencia con los modelos existentes de SHRP y comparar los PG calculados por ambos modelos (SHRP Y LTPP). Estos nuevos modelos desarrollados por LTPP permitieron fortalecer tres aspectos a la hora de estimar la temperatura del pavimento:

- Unir la información obtenida de diferentes puntos aleatorios de la respuesta del pavimento con condiciones críticas de diseño.

- Validar modelos para las relaciones entre condiciones ambientales y las condiciones de las propiedades de los materiales del pavimento.
- Adquirir nuevo conocimiento de la magnitud e impacto de los cambios realizados con estos nuevos modelos desarrollados por el LTPP¹⁵.

En el modelo LTPP se incluye información de la localización geográfica (latitud y longitud) y elevación de las estaciones, así como el espesor del pavimento e información climática de las estaciones meteorológicas cercanas a las estaciones de registro.

4.1. Modelos de SHRP para la predicción de la temperatura alta y baja del pavimento

- Temperatura mínima del pavimento: a SHRP se le dificultó en un principio desarrollar un modelo para estimar la temperatura mínima del pavimento, debido a que no tenían los datos suficientes para obtener el modelo deseado. Con el tiempo, SHRP obtuvo la información necesaria para desarrollar un modelo en función de la profundidad y la temperatura del aire, como se aprecia en la ecuación 4-1.

- Ecuación 4-1

$$T_{\text{mín pav } 50\%} (T_{\text{mín aire, d}}) = T_{\text{mín aire}} + 0,051 * d + 0,000063 * d^2$$

¹⁵ BONILLA MIRANDA, Elías. *Determinación del tipo de cemento asfáltico según el grado de desempeño, de acuerdo con la zonificación climática y las cargas de tránsito del país.* p. 95.

Donde

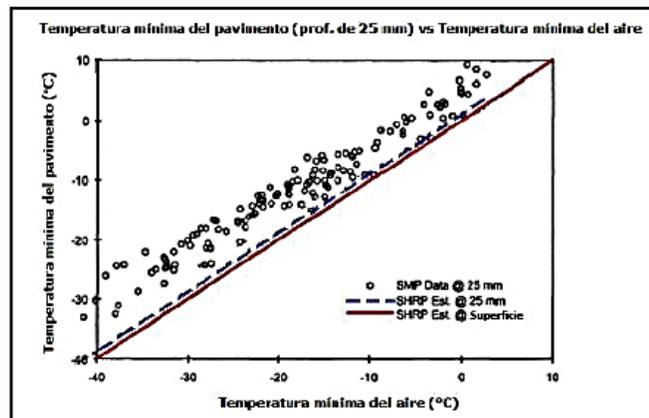
$T_{\text{mín pav}}$: temperatura mínima del pavimento a un espesor d , en grados centígrados.

$T_{\text{mín aire}}$: temperatura mínima promedio del aire registrado de datos, en grados centígrados.

d : profundidad a la cual se requiere calcular la temperatura en el pavimento, en milímetros.

En el estudio realizado por el LTPP para comparar el modelo de temperatura mínima del pavimento con SHRP, con la información recolectada por el SMP, se observó una diferencia significativa entre ambos datos, resultando que el modelo de SHRP se considere conservador. A continuación, una figura que permite visualizar el resultado en esa investigación¹⁶.

Figura 28. **Estimación de la temperatura mínima del pavimento con el modelo SHRP**



Fuente: Administración Federal de Carreteras, modificado por el autor.

¹⁶ BONILLA MIRANDA, Elías. *Determinación del tipo de cemento asfáltico según el grado de desempeño, de acuerdo con la zonificación climática y las cargas de tránsito del país.* p. 96.

En esta figura se puede apreciar el comportamiento del modelo SHRP que es muy conservador; la estimación de la temperatura mínima del pavimento a una profundidad de 25 mm (línea azul punteada), y a nivel de superficie (línea roja continua) obtiene temperaturas hasta unos 12 °C por debajo de los datos recolectados por el SMP (círculos).

- Temperatura máxima del pavimento: en los Estados Unidos se crearon sitios de registro donde se tomaron datos de temperatura del pavimento, temperatura del aire, latitud, absorción solar y la velocidad del viento. Por medio de estos datos se desarrolló el modelo de estimación de la temperatura máxima del pavimento. La ecuación 4 – 2 permite encontrar la temperatura máxima del pavimento en su superficie. Por otra parte, la ecuación 4 – 3 permite encontrar la temperatura máxima del pavimento a una profundidad determinada. Se debe resaltar que ambas ecuaciones calculan la temperatura máxima del pavimento a una confiabilidad del 50 %.

- Ecuación 4-2

$$T_{\text{máx pav superf}} = (T_{\text{máx aire}}, \text{Lat}) = T_{\text{máx aire}} - (0,00618 * \text{Lat}^2) + (0,2289 * \text{Lat}) + 24,4$$

Donde

$T_{\text{máx pav superf}}$: temperatura máxima del pavimento en su superficie en grados centígrados.

$T_{\text{máx aire}}$: temperatura del aire promedio de los 7 días más calientes, en grados centígrados.

Lat: latitud de la sección, en grados centígrados¹⁷.

¹⁷ BONILLA MIRANDA, Elías. *Determinación del tipo de cemento asfáltico según el grado de desempeño, de acuerdo con la zonificación climática y las cargas de tránsito del país.* p. 97.

○ Ecuación 4-3

$$T_{\text{máx pav}} (T_{\text{máx aire}}, d, T_{\text{máx pav superf}}) = T_{\text{máx pav superf}} * (1 - 0,063 * d + 0,007 * d^2 - 0,0004 * d^3)$$

Donde

$T_{\text{máx pav}}$: temperatura máxima del pavimento a cierta profundidad, en grados centígrados.

$T_{\text{máx aire}}$: temperatura del aire promedio de los 7 días más calientes, en grados centígrados.

d : es la profundidad desde la superficie, en pulgadas.

$T_{\text{máx pav superf}}$: temperatura máxima del pavimento en su superficie, en grados centígrados.¹⁸

De la combinación de las ecuaciones anteriores se deduce un nuevo modelo de temperatura máxima del pavimento a una profundidad de 20 mm y nivel de confiabilidad del 50 %. Este modelo se describe en la ecuación siguiente y es utilizado por SHRP para calcular la temperatura máxima del pavimento:

○ Ecuación 4-4

$$T_{\text{máx pav 50 \%}} (T_{\text{máx aire}}, Lat) = T_{\text{máx aire}} - (0,00618 * Lat^2) + (0,2289 * Lat) + 24,4$$

Donde

$T_{\text{máx pav 50 \%}}$: temperatura máxima del pavimento a una profundidad de 20 mm y un nivel de confiabilidad del 50 %, en grados centígrados.

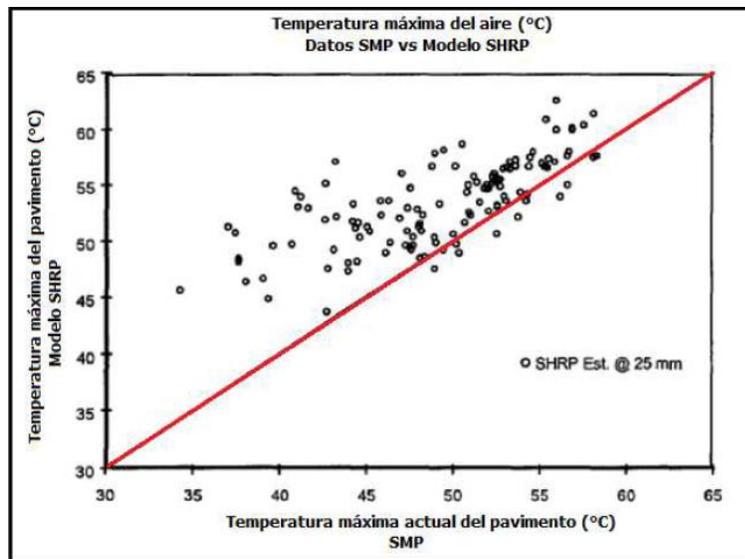
¹⁸ BONILLA MIRANDA, Elías. *Determinación del tipo de cemento asfáltico según el grado de desempeño, de acuerdo con la zonificación climática y las cargas de tránsito del país.* p. 98.

$T_{\text{máx aire}}$: temperatura del aire promedio de los 7 días más calientes, en grados centígrados.

Lat: latitud de la sección, en grados centígrados.¹⁹

El método LTPP realizó una comparación entre los datos registrados del SMP y los datos del modelo de temperatura máxima del pavimento de SHRP. A continuación se muestra el comportamiento conservador que se obtuvo, así como los valores estimados de la temperatura máxima del pavimento, utilizando el modelo SHRP a una profundidad de 25 mm, a un promedio de 5 °C arriba de los datos reales registrados por SMP a la misma profundidad.

Figura 29. **Estimación de la temperatura máxima del pavimento con el modelo SHRP**



Fuente: Administración Federal de Carreteras, modificado por el autor.

¹⁹ BONILLA MIRANDA, Elías. *Determinación del tipo de cemento asfáltico según el grado de desempeño, de acuerdo con la zonificación climática y las cargas de tránsito del país.* p. 100.

4.2. Cálculo de los modelos SHRP a diferentes niveles de confiabilidad

SHRP establece una distribución normal de los datos de temperatura mínima del aire para calcular la temperatura mínima o máxima en niveles de confianza mayores al 50 %. Utilizando la ecuación 4-1 se obtiene la temperatura mínima del pavimento, tomando en cuenta algunas modificaciones de cómo se nombran sus variables.

- Ecuación 4-5

$$T_{\text{mín pav R\%}} = T_{\text{mín pav 50\%}} + Z * \sigma_{\text{mín aire}}$$

Donde

$T_{\text{mín pav R\%}}$: temperatura mínima del pavimento a un nivel de confianza requerido, en grados centígrados.

$T_{\text{mín pav 50\%}}$: temperatura mínima del pavimento que se obtiene de la ecuación 4-1, en grados centígrados.

Z: desviación normal estándar

$\sigma_{\text{mín aire}}$: desviación estándar de las temperaturas mínimas del aire, en grados centígrados.²⁰

- Para el cálculo de la temperatura máxima se utiliza la ecuación 4-6:

$$T_{\text{máx pav R\%}} = T_{\text{máx pav 50\%}} + Z * \sigma_{\text{máx aire}}$$

²⁰ BONILLA MIRANDA, Elías. *Determinación del tipo de cemento asfáltico según el grado de desempeño, de acuerdo con la zonificación climática y las cargas de tránsito del país.* p. 101.

Donde

$T_{\text{máx pav R\%}}$: temperatura máxima del pavimento a un nivel de confianza requerido, en grados centígrados.

$T_{\text{máx pav 50\%}}$: temperatura máxima del pavimento que se obtiene de la ecuación 4-4, en grados centígrados.

Z: es la desviación normal estándar.

$\sigma_{\text{máx aire}}$: desviación estándar de la temperatura de 7 días más calientes del aire en grados centígrados.²¹

4.3. Modelos LTPP para la predicción de la temperatura alta y baja del pavimento

- Temperatura mínima del pavimento: utilizando los resultados estadísticos realizados con base en los datos creados por SMP, LTPP desarrolló un nuevo modelo. En los análisis se encontró que la temperatura del aire, la latitud y la profundidad son los términos que mejor se ajustan al modelo. En la tabla XIII se muestran las características de cada uno de estos términos dentro del modelo.

Tabla XIII. **Variable más significativa del modelo LTPP–temperatura mínima del pavimento**

Término	Características
Temperatura del aire	<ul style="list-style-type: none">• Según el análisis de correlación, este término tiene la mayor correlación con la temperatura del pavimento.<ul style="list-style-type: none">○ Su relación es lineal.<ul style="list-style-type: none">▪ En el proceso de selección de variables se encontró que este término tiene el mayor peso en el modelo.

²¹ BONILLA MIRANDA, Elías. *Determinación del tipo de cemento asfáltico según el grado de desempeño, de acuerdo con la zonificación climática y las cargas de tránsito del país.* p. 102.

Continuación de la tabla XIII.

Latitud	<ul style="list-style-type: none"> • Después de la temperatura del aire, este término cuenta con una alta correlación con la temperatura del pavimento. <ul style="list-style-type: none"> ○ Su relación es no lineal. Por esta razón al ajustar el modelo se utilizó una relación cuadrática sobre esta variable.
Profundidad	<ul style="list-style-type: none"> • Su correlación con la temperatura del pavimento no es tan alta como los dos. primeros términos. • Su relación es no lineal. Se utilizó una variable logarítmica para poder ajustarlo en el modelo.

Fuente: BONILLA MIRANDA, Elías. *Determinación del tipo de cemento asfáltico según el grado de desempeño, de acuerdo con la zonificación climática y las cargas de tránsito del país.* p. 105.

La siguiente ecuación describe el modelo obtenido por parte del LTPP para calcular la temperatura mínima del pavimento a un nivel de confianza 50 %.

○ Ecuación 4-7

$$T_{\text{mín pav}} (T_{\text{mín aire}}, \text{Lat}, d) = -1,56 + (0,72 * T_{\text{mín aire}}) - (0,0004 * \text{Lat}^2) + (6,26 * \log_{10}(d+25))$$

Donde

$T_{\text{mín pav}}$: temperatura mínima del pavimento a cierta profundidad y un nivel de confiabilidad del 50 %, en grados centígrados.

$T_{\text{mín aire}}$: temperatura mínima del aire, en grados centígrados.

Lat: latitud de la sección, en grados centígrados.

d: es la profundidad desde la superficie, en milímetros.²²

LTPP establece la siguiente ecuación para calcular la temperatura mínima del pavimento en niveles de confianza mayores de un 50%.

²² BONILLA MIRANDA, Elías. *Determinación del tipo de cemento asfáltico según el grado de desempeño, de acuerdo con la zonificación climática y las cargas de tránsito del país.* p. 103.

o Ecuación 4-8

$$T_{\text{mín pav}} (T_{\text{mín aire}}, \sigma_{\text{mín aire}}, \text{Lat}, d) = -1,56 + (0,72 * T_{\text{mín aire}}) - (0,004 * \text{Lat}^2) + (6,26 * \log_{10} (d+25) + Z * (4,4+0.52* \sigma_{\text{aire}}^2)^{0,5})$$

Donde

$T_{\text{mín pav}}$: temperatura mínima del pavimento a cierta profundidad y un nivel de confiabilidad del 50 %, en grados centígrados.

$T_{\text{mín aire}}$: temperatura mínima del aire, en grados centígrados.

Lat: latitud de la sección, en grados centígrados.

d: profundidad desde la superficie, en milímetros.

σ_{aire}^2 : distribución estándar de la temperatura baja del aire, en grados centígrados.

Z: desviación normal estándar.²³

Existe una diferencia entre la ecuación 4-7 y 4-8, es el término de confiabilidad, que se presenta en la ecuación 4-8 ($Z * (4,4+0,52* \sigma_{\text{aire}}^2)^{0,5}$), el cual permite calcular la temperatura mínima del pavimento a diferentes niveles de confiabilidad.

- Temperatura máxima del pavimento: basado en el análisis estadístico de la base de datos del SMP, LTPP determinó términos que mejoran al modelo. Dichos términos comparten prácticamente las mismas características descritas anteriormente. A continuación se presentan las características de los términos que componen este modelo.

²³ BONILLA MIRANDA, Elías. *Determinación del tipo de cemento asfáltico según el grado de desempeño, de acuerdo con la zonificación climática y las cargas de tránsito del país.* p. 104.

Tabla XIV. **Variables más significativas del modelo LTPP–temperatura máxima del pavimento**

Término	Característica
Temperatura del aire	<ul style="list-style-type: none"> • Este término tiene la mayor correlación con la temperatura del pavimento. <ul style="list-style-type: none"> ○ Su relación es lineal.
Profundidad	<ul style="list-style-type: none"> • Es el último término en tener una correlación considerable con la temperatura del pavimento. <ul style="list-style-type: none"> ○ Su relación es no lineal. Su utilizó una variable logarítmica para poder ajustarlo.
Latitud	<ul style="list-style-type: none"> • Este término también cuenta con una alta correlación con la temperatura del pavimento. <ul style="list-style-type: none"> ○ Su relación es no lineal. Por esta razón al ajustar el modelo se utilizó una relación cuadrática sobre esta variable.

Fuente: BONILLA MIRANDA, Elías. *Determinación del tipo de cemento asfáltico según el grado de desempeño, de acuerdo con la zonificación climática y las cargas de tránsito del país.* p. 105.

LTPP describe una ecuación para calcular la temperatura máxima del pavimento a un nivel de confianza de un 50 %.

- Ecuación 4-9

$$T_{\text{máx pav}} (T_{\text{máx aire}}, \text{Lat}, H) = 54,32 + (0,78 * T_{\text{máx aire}}) - (0,0025 * \text{Lat}^2) - (15,14 * \log_{10} (H+25))$$

Donde

$T_{\text{máx pav}}$: temperatura máxima del pavimento a cierta profundidad y un nivel de confiabilidad del 50 %, en grados centígrados.

$T_{\text{máx aire}}$: temperatura máxima del aire, en grados centígrados.

Lat: latitud de la sección, en grados centígrados.

H: profundidad desde la superficie, en milímetros.²⁴

LTPP también establece una ecuación (4-10) para calcular la temperatura máxima del pavimento a niveles de confianza mayores a un 50%, esto lo realizó sumando un término de confiabilidad a la ecuación 4-9.

○ Ecuación 4-10

$$T_{\text{máx pav}}(T_{\text{máx aire}}, \text{Lat}, H) = 54,32 + (0,78 * T_{\text{máx aire}}) - (0,0025 * \text{Lat}^2) - (15,14 * \log_{10}(H+25) + Z * (9+0,61 * \sigma^2_{\text{aire}})^{0,5})$$

Donde

$T_{\text{máx pav}}$: temperatura máxima del pavimento a cierta profundidad y un nivel de confiabilidad del 50 %, en grados centígrados.

$T_{\text{máx aire}}$: temperatura máxima del aire, en grados centígrados.

Lat: latitud de la sección, en grados centígrados.

H: profundidad desde la superficie, en milímetros.

σ^2_{aire} : distribución estándar de los siete días más calientes, en grados centígrados.

Z: desviación normal estándar.²⁵

Utilizando los modelos proporcionados por SHRP y LTPP descritos anteriormente, se puede calcular las temperaturas del pavimento basadas en datos ya obtenidos. Los datos utilizados son:

²⁴ BONILLA MIRANDA, Elías. *Determinación del tipo de cemento asfáltico según el grado de desempeño, de acuerdo con la zonificación climática y las cargas de tránsito del país*. p. 106.

²⁵ Op. Cit. p. 107.

- Las temperaturas del aire (máximas o mínimas, según corresponda) y su desviación estándar.
- Confiabilidad del 50 % y 85 %.
- La latitud de la estación meteorológica.
- Para la profundidad, se define a unos 20 mm. Este dato corresponde a lo que establece SHRP y LTPP para el caso de la profundidad del pavimento.

Cabe mencionar que para la temperatura promedio del pavimento se tomarán los resultados obtenidos de la temperatura promedio del aire.

5. TEMPERATURAS DEL PAVIMENTO OBTENIDAS A PARTIR DE LOS MODELOS SHRP Y LTPP

5.1. Temperatura máxima del pavimento (SHRP Y LTPP)

Por medio de las ecuaciones desarrolladas por SHRP y LTPP se obtuvieron las temperaturas máximas del pavimento que se presentan a continuación. Para SHRP se utilizaron los datos de latitud y los valores obtenidos de temperaturas máximas del aire a un nivel de confiabilidad de 50 % y 85 %, correspondientes a cada estación meteorológica escogida en esta investigación. Con el método LTPP se utilizó la temperatura máxima del aire obtenida en cada estación meteorológica con su desviación estándar. Igual que en SHRP, se emplearon datos de la latitud de cada estación y se especificó una profundidad de 20 mm.

Tabla XV. **Temperatura máxima del pavimento obtenida para cada estación meteorológica según el modelo SHRP o LTPP**

Estación meteorológica	SHRP (°C)	SHRP (°C)	LTPP (°C)	LTPP (°C)
	Confiabilidad 50 %	Confiabilidad 85 %	Confiabilidad 50 %	Confiabilidad 85 %
ALAMEDA ICTA	50,15	50,42	47,26	50,38
ASUNCIÓN MITA R.H.	59,75	60,01	54,78	57,90
CAMANTULUL	58,85	59,04	54,08	57,20
CAMOTÁN	58,61	59,14	53,84	56,97
CHAMPERICO FEGUA	59,37	59,57	54,49	57,60
CHINIQUE	49,96	50,69	47,07	50,23
COBÁN	52,06	52,46	48,66	51,79
CUBULCO	56,70	57,55	52,31	55,50
CUILCO	56,85	57,28	52,40	55,53
EL CAPITÁN	51,56	51,98	48,36	51,49
EL TABLÓN	47,35	47,81	45,05	48,19
ESQUIPULAS	53,56	54,20	49,93	53,08
FLORES AEROP	59,03	59,57	53,95	57,09

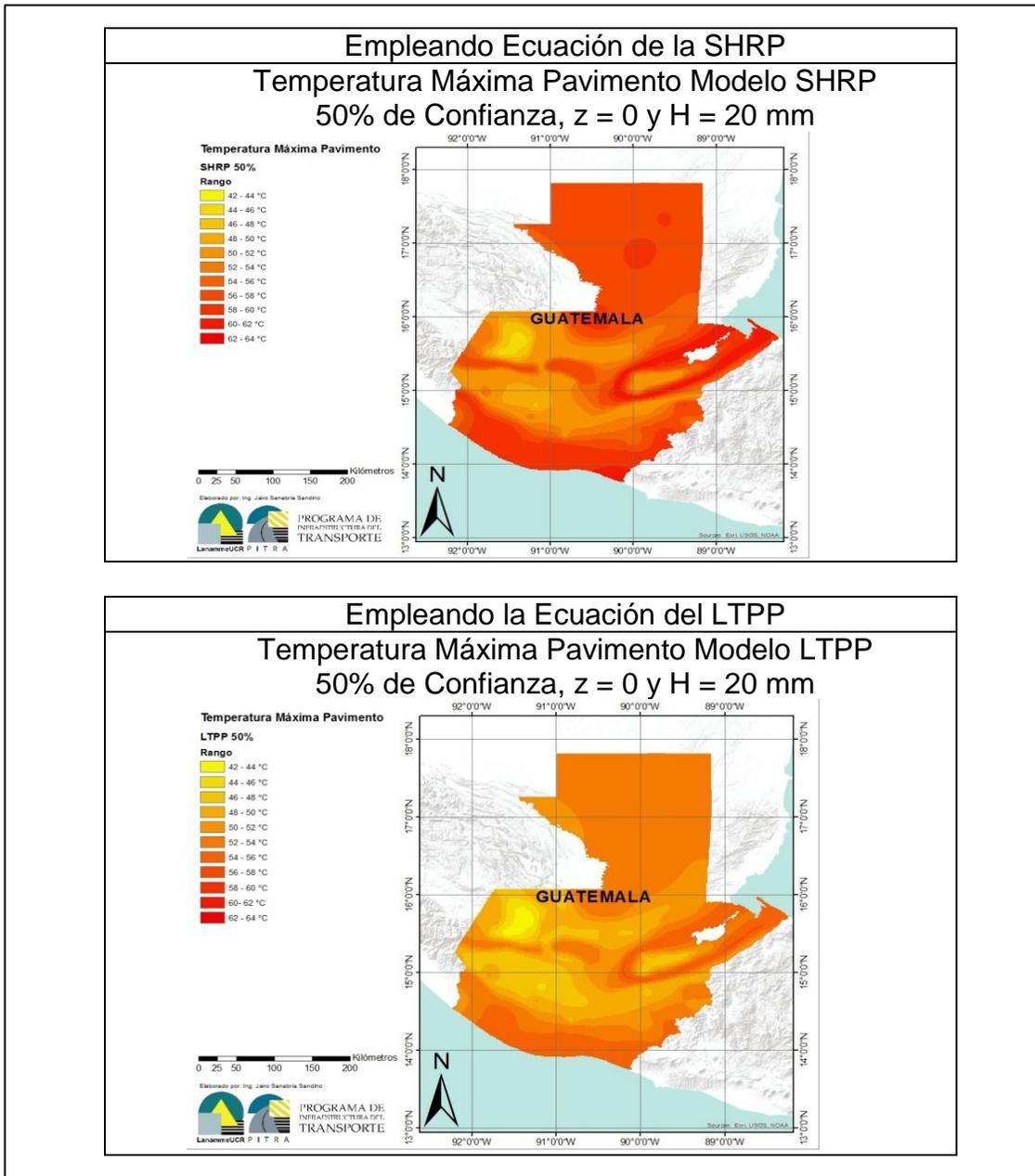
Continuación de la tabla XV.

Estación meteorológica	SHRP (°C) Confiabilidad 50 %	SHRP (°C) Confiabilidad 85 %	LTPP (°C) Confiabilidad 50 %	LTPP (°C) Confiabilidad 85 %
HUEHUETENANGO	52,33	53,04	48,88	52,04
INSIVUMEH	52,06	52,36	48,76	51,88
LA CEIBITA	56,56	56,88	52,28	55,40
LA FRAGUA	60,33	61,05	55,16	58,33
LA UNIÓN	53,57	54,06	49,89	53,02
LABOR OVALLE	48,93	49,43	46,28	49,42
LAS VEGAS PHC	58,75	59,48	53,86	57,03
LOS ESCLAVOS	57,40	57,76	52,96	56,08
MONTÚFAR	60,12	60,31	55,13	58,24
NEBAJ	49,46	50,19	46,63	49,80
PANZÓS PHC ALTA VERAPAZ	58,87	59,14	53,97	57,09
POTRERO CARRILLO	48,32	49,03	45,82	48,98
PUERTO BARRIOS PHC	56,66	57,13	52,22	55,35
QUEZADA	55,54	55,87	51,51	54,63
RETALHULEU AEROPUERTO	59,90	60,18	54,88	58,00
SÁBANA GRANDE	49,64	49,93	46,89	50,01
SAN JERÓNIMO RH	55,74	56,51	51,57	54,74
SAN JOSÉ AEROPUERTO	59,26	59,73	54,44	57,57
SAN MARCOS PHC	56,66	57,07	52,30	55,43
SAN PEDRO NECTA	48,09	48,44	45,56	48,68
SANTA CRUZ BALANYÁ	50,53	51,06	47,55	50,69
SANTA MARÍA CAHABÓN	52,65	53,06	49,11	52,23
SANTIAGO ATITLÁN	55,95	56,40	51,78	54,91
SUIZA CONTENTA	50,56	51,3	47,58	50,74
TECÚN UMÁN FEGUA	53,43	53,78	49,81	52,93
TIKAL PETÉN	59,17	59,66	54,02	57,16
TODOS SANTOS	45,26	45,95	43,35	46,51

Fuente: elaboración propia.

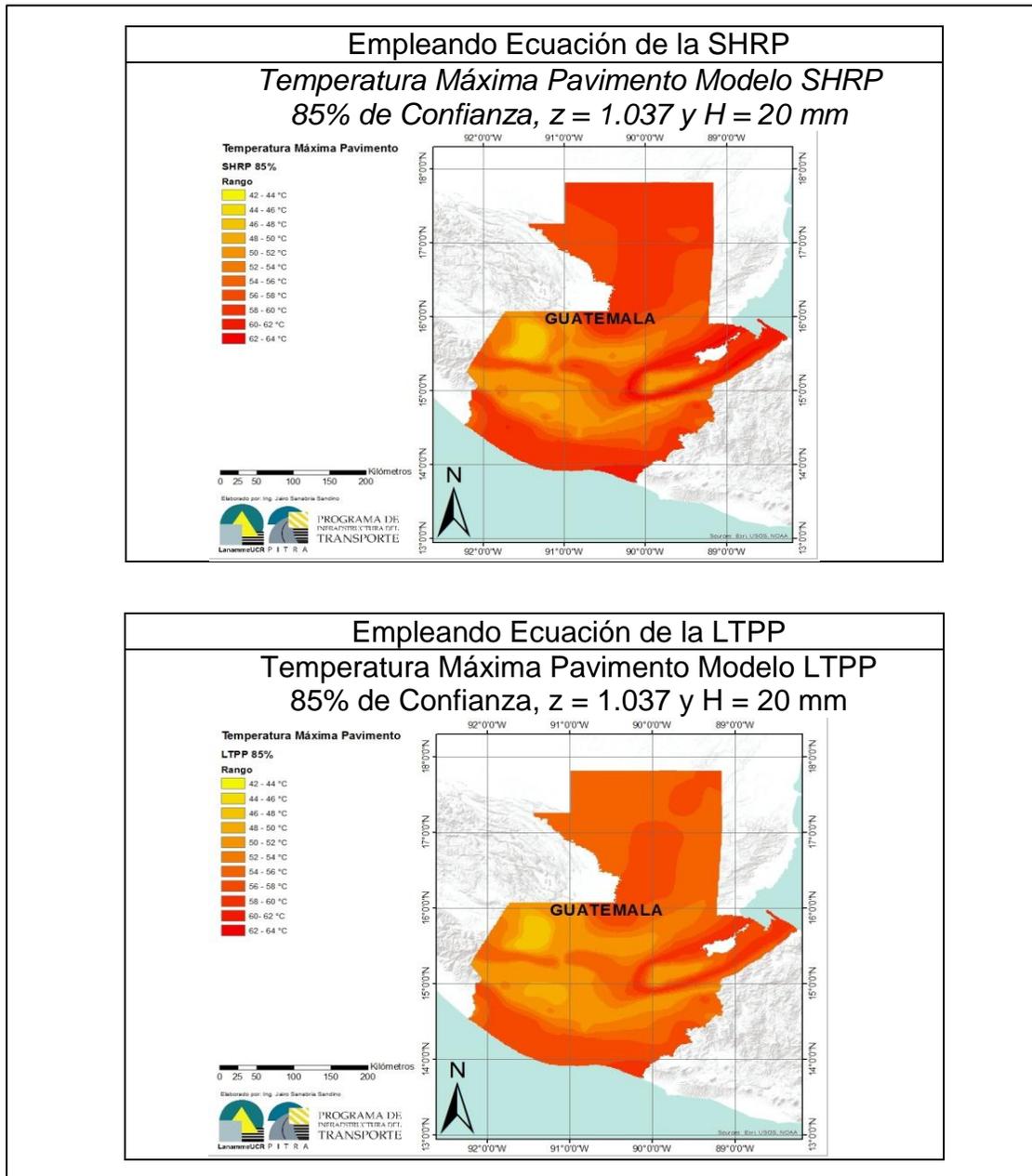
La diferencia de los resultados obtenidos de cada una de las ecuaciones de los sistemas SHRP y LTPP para la temperatura máxima del pavimento con un 50 % y 85 % de confiabilidad se muestra en los siguientes mapas:

Figura 30. Resultados de las temperaturas máximas de los sistema SHRP y LTPP a un 50 % de confianza



Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, elaborado por el Ing. Jairo Sanabria Sandino.

Figura 31. **Resultados de las temperaturas máximas de los sistemas SHRP y LTPP a un 85 % de confianza**



Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, elaborado por el Ing. Jairo Sanabria Sandino.

5.2. Temperatura mínima del pavimento (SHRP y LTPP)

Los resultados de las temperaturas mínimas del pavimento se basan en las ecuaciones desarrolladas por SHRP y LTPP. SHRP utilizó los valores obtenidos de temperaturas mínimas del aire a un nivel de confiabilidad del 50 y 85 % en cada estación meteorológica escogida para esta investigación. A diferencia de SHRP, LTPP utilizó la temperatura mínima del aire obtenida con su desviación correspondiente de cada estación en conjunto con su latitud.

Tabla XVI. Temperatura mínima del pavimento obtenida para cada estación meteorológica según el modelo SHRP y LTPP

Estación meteorológica	SHRP (°C) Confiabilidad 50 %	SHRP (°C) Confiabilidad 85 %	LTPP (°C) Confiabilidad 50 %	LTPP (°C) Confiabilidad 85 %
ALAMEDA ICTA	12,31	9,07	16,14	12,94
ASUNCIÓN MITA R.H.	22,60	20,88	23,58	21,08
CAMANTULUL	22,02	20,16	23,17	20,61
CAMOTÁN	22,09	19,73	23,16	20,39
CHAMPERICO FEGUA	24,87	22,94	25,22	22,64
CHINIQUE	11,13	8,33	15,24	12,27
COBÁN	14,98	12,06	17,96	14,93
CUBULCO	16,50	13,14	19,10	15,84
CUILCO	17,16	14,21	19,54	16,49
EL CAPITÁN	14,79	12,76	17,92	15,30
EL TABLÓN	10,72	7,87	14,98	11,98
ESQUIPULAS	19,08	16,88	21,02	18,33
FLORES AEROPUERTO	21,84	19,04	22,71	19,74
HUEHUETENANGO	12,51	8,78	16,20	12,74
INSIVUMEH	16,84	14,80	19,41	16,78
LA CEIBITA	15,16	11,56	18,21	14,82
LA FRAGUA	22,76	20,23	23,62	20,79
LA UNIÓN	19,64	16,93	21,38	18,45
LABOR OVALLE	9,09	4,69	13,79	9,94
LAS VEGAS PHC	23,40	21,01	24,01	21,23
LOS ESCLAVOS	19,71	17,04	21,51	18,60
MONTÚFAR	24,98	23,39	25,36	22,90
NEBAJ	11,00	5,82	15,10	10,78
PANZOS PHC ALTA VERAPAZ	23,78	21,51	24,30	21,58
POTRERO CARRILLO	10,80	6,24	15,04	11,09
PUERTO BARRIOS PHC	23,45	21,23	24,02	21,32
QUEZADA	17,62	15,35	20,00	17,28
RETALHULEU AEROPUERTO	22,81	21,64	23,71	21,38
SÁBANA GRANDE	19,95	17,62	21,67	18,92

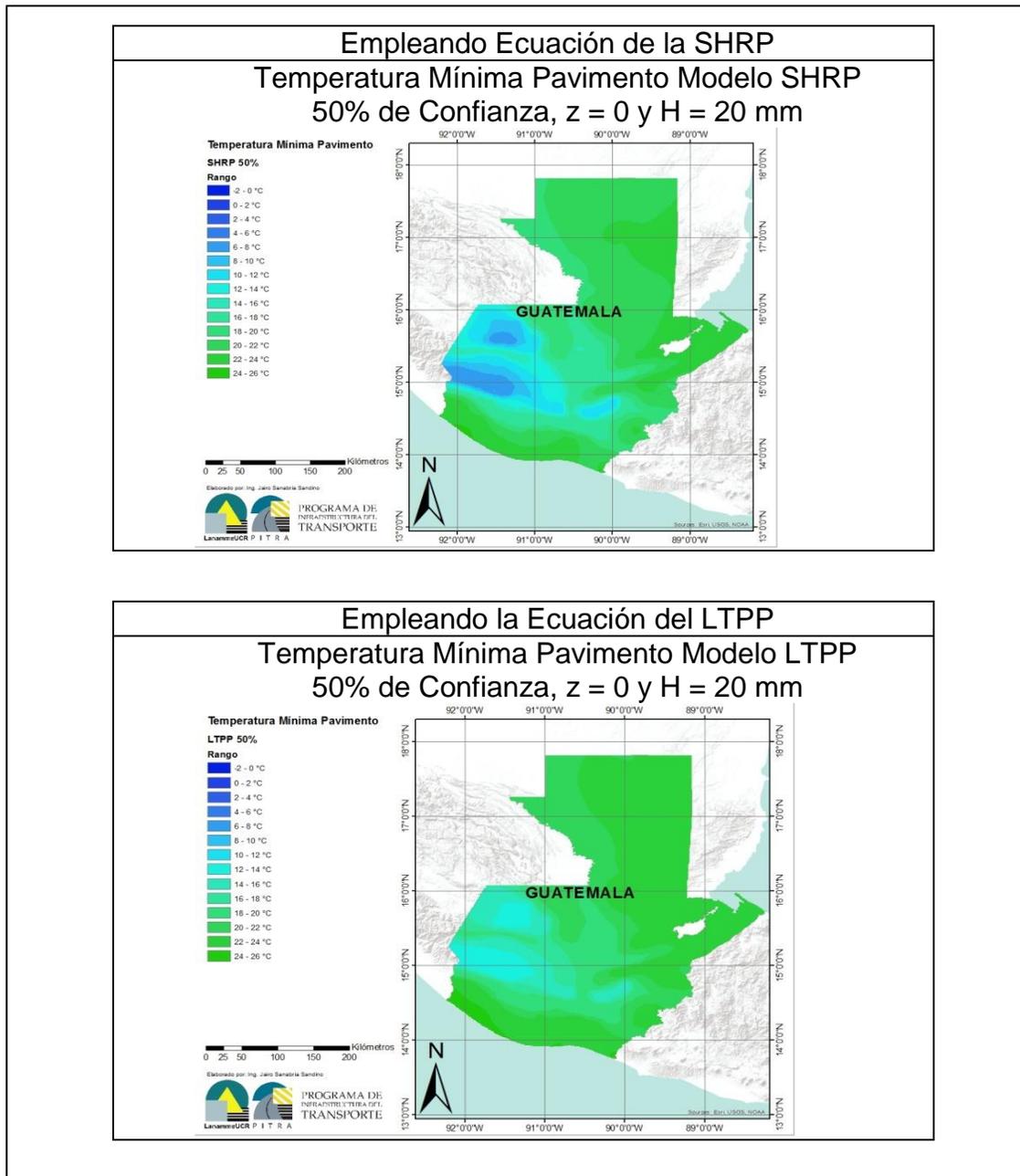
Continuación en la tabla XVI.

SAN JERÓNIMO RH	15,82	12,70	18,61	15,48
SAN JOSÉ AEROPUERTO	23,27	21,12	24,11	21,44
SAN MARCOS PHC	8,07	5,68	13,04	10,27
SAN PEDRO NECTA	14,70	12,47	17,75	15,05
SANTA CRUZ BALANYÁ	11,61	8,90	15,63	12,70
SANTA MARIA CAHABÓN	21,59	19,16	22,70	19,91
SANTIAGO ATITLÁN	13,60	10,65	17,07	14,02
SUIZA CONTENTA	10,44	7,54	14,79	11,77
TECUN UMÁN FEGUA	23,47	21,92	24,17	21,72
TIKAL PETÉN	21,60	18,10	22,49	19,16
TODOS SANTOS	8,92	6,46	13,59	10,78

Fuente: elaboración propia.

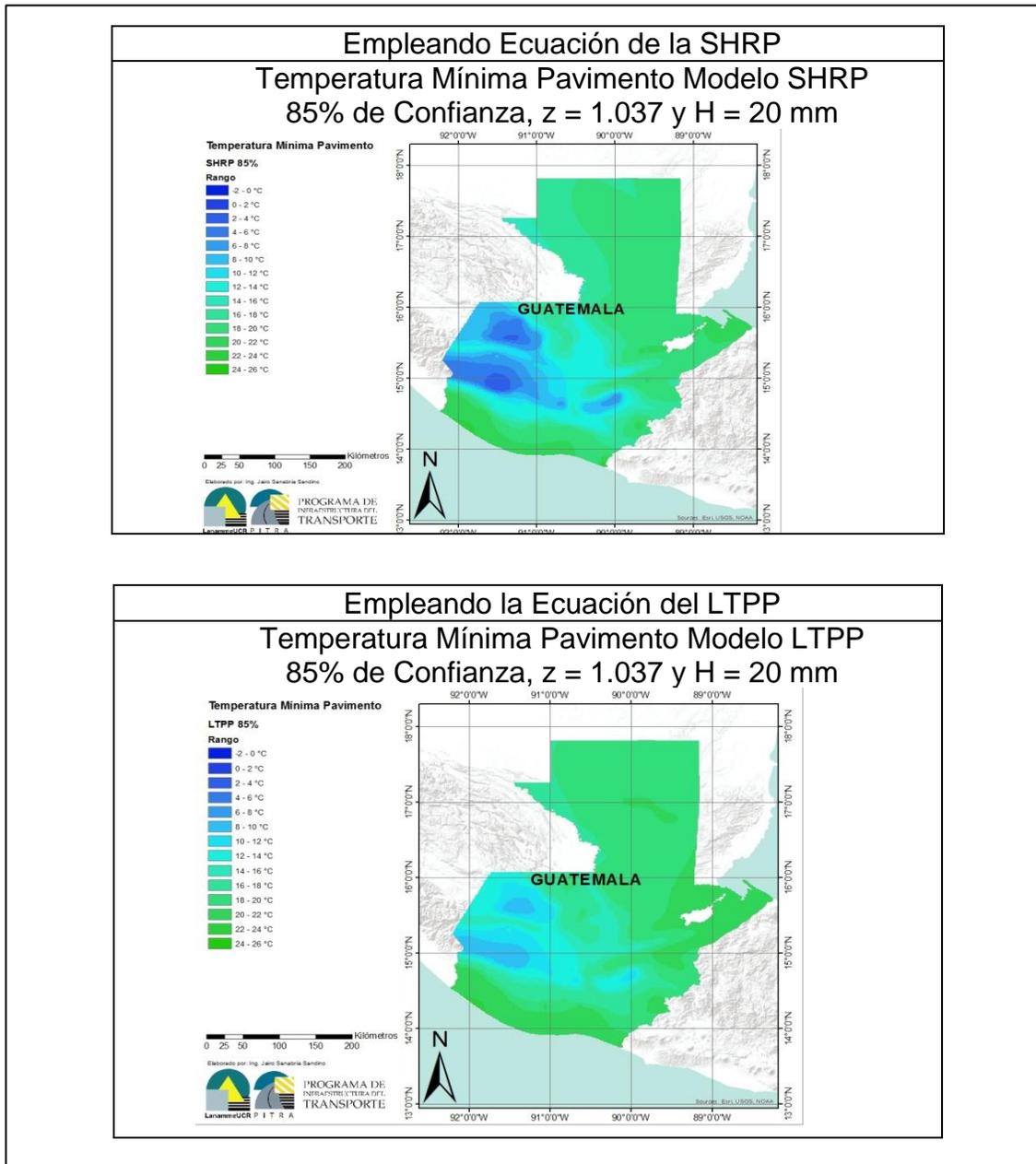
La diferencia de los resultados obtenidos de cada una de las ecuaciones de los sistemas SHRP y LTPP para la temperatura mínima del pavimento con un 50 % y 85 % de confiabilidad se muestra en los siguientes mapas:

Figura 32. Resultados de las temperaturas mínimas de los sistemas SHRP y LTPP a un 50 % de confianza



Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, elaborado por el Ing. Jairo Sanabria Sandino.

Figura 33. **Resultados de las temperaturas mínimas de los sistemas SHRP y LTPP a un 85 % de confianza**



Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, elaborado por el Ing. Jairo Sanabria Sandino.

Los valores obtenidos del cálculo de temperatura mínima no se encuentran por debajo de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo tanto, el parámetro de temperatura mínima no es determinante en el análisis. Por su parte, la temperatura máxima define el límite superior de la selección de especificación por grado de desempeño (PG). El elemento restante consiste en seleccionar valores de temperatura intermedia, dentro de la especificación, que den cobertura al fenómeno de fatiga. Para todas las estaciones se determinó que el cálculo de la temperatura máxima del pavimento es inferior o a lo sumo igual a $64\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Para las 40 estaciones meteorológicas, se grafican los resultados de temperatura del aire (mínima, máxima) vs. la temperatura del pavimento (mínima, máxima), donde se muestran tanto los resultados de la SHRP, como los derivados del LTPP y se comparan con las especificaciones Superpave para ligantes asfálticos. Esto permite verificar, en forma general, la distribución de temperaturas máxima, mínima. Dentro de las especificaciones para Superpave, se escogen dos tipos de especificaciones, se verifica para PG 64-22(25) y PG 58-22(22), donde la selección de $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ como valor mínimo cubre las condiciones presentes en la totalidad de los mapas de temperatura mínima del pavimento y el valor intermedio se relaciona con la fatiga.

Dichas gráficas y sus especificaciones se muestran en la sección de apéndices, también se agrega, para la investigación, un porcentaje de confiabilidad del 98 %.

6. MAPAS DE GRADO DE DESEMPEÑO DEL PAÍS

Con base en los datos de temperaturas máximas, promedios y mínimas del aire de cada una de las estaciones meteorológicas, se realizó el cálculo de los mapas de desempeño para obtener las temperaturas máximas y mínimas del pavimento, mediante las ecuaciones definidas por SHRP y LTPP. El programa denominado ArcGIS será la herramienta a utilizar para determinar el análisis, correlación y modelado espacial de los datos.

6.1. Determinación de zonas para el desarrollo de modelos PG según la elevación

Para determinar la zonificación, se procedió a ubicar los puntos de mayor y menor altitud dentro de la República de Guatemala. Utilizando las regiones de mayor altitud se obtuvo la división primaria; dando como resultado:

- Vertiente atlántica
- Vertiente pacífica

Posteriormente, se definieron las subdivisiones de cada región.

Tabla XVII. **Zonas climáticas de Guatemala**

Región climática	Vertiente
Atlántico norte	Atlántico
Atlántico centro	
Atlántico sur	
Pacífico norte	Pacífico
Pacífico sur	

Fuente: elaboración propia.

A continuación se presentan las estaciones meteorológicas y su localización dentro de cada una de las zonas climáticas definidas anteriormente.

Tabla XVIII. **Estaciones meteorológicas de la vertiente atlántica**

Vertiente	ESTACION METEOROLÓGICA	REGIÓN
Atlántico	FLORES AEROPUERTO	NORTE
	TIKAL PETÉN	NORTE
	COBÁN	CENTRO
	LAS VEGAS PHC	CENTRO
	PANZÓS PHC ALTA VERAPAZ	CENTRO
	PUERTO BARRIOS PHC	CENTRO
	SANTA MARÍA CAHABON	CENTRO
	TODOS SANTOS	CENTRO
	CAMOTÁN	SUR
	CHINIQUE	SUR
	CUBULCO	SUR
	ESQUIPULAS	SUR
	HUEHUETENANGO	SUR
	LA FRAGUA	SUR
	LA UNIÓN	SUR
	NEBAJ	SUR
	POTRERO CARRILLO	SUR
	SAN JERÓNIMO R.H	SUR
	SAN PEDRO NECTA	SUR

Fuente: elaboración propia.

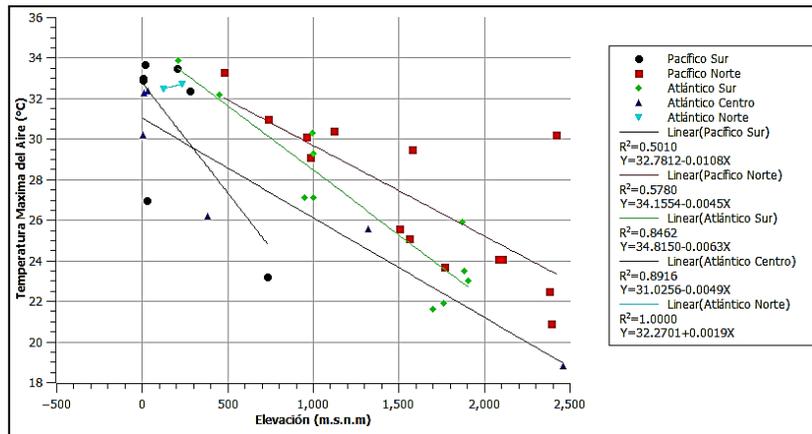
Tabla XIX. **Estaciones meteorológicas de la vertiente pacífica**

Vertiente	ESTACION METEREOLÓGICA	REGIÓN
Pacífico	ALAMEDA ICTA	NORTE
	ASUNCIÓN MITA R.H.	NORTE
	CUILCO	NORTE
	EL CAPITÁN	NORTE
	EL TABLÓN	NORTE
	INSIVUMEH	NORTE
	LA CEIBITA	NORTE
	LABOR OVALLE	NORTE
	LOS ESCLAVOS	NORTE
	QUEZADA	NORTE
	SAN MARCOS PHC	NORTE
	SANTA CRUZ BALANYÁ	NORTE
	SANTIAGO ATITLÁN	NORTE
	SUIZA CONTENTA	NORTE
	CAMANTULUL	SUR
	CHAMPERICO FEGUA	SUR
	MONTÚFAR	SUR
	RETALHULEU AEROPUERTO	SUR
	SABANA GRANDE	SUR
	SAN JOSÉ AEROPUERTO	SUR
TECÚN UMÁN FEGUA AYUTLA	SUR	

Fuente: elaboración propia.

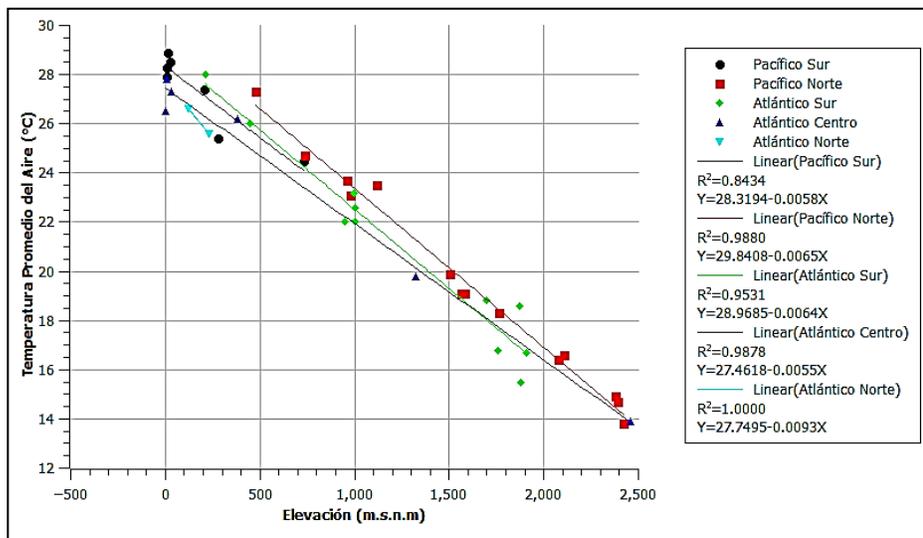
En las siguientes gráficas se muestra el comportamiento de la temperatura (máxima, promedio y mínima) del aire para cada una de las regiones.

Figura 34. Comportamiento entre la temperatura máxima del aire y la elevación



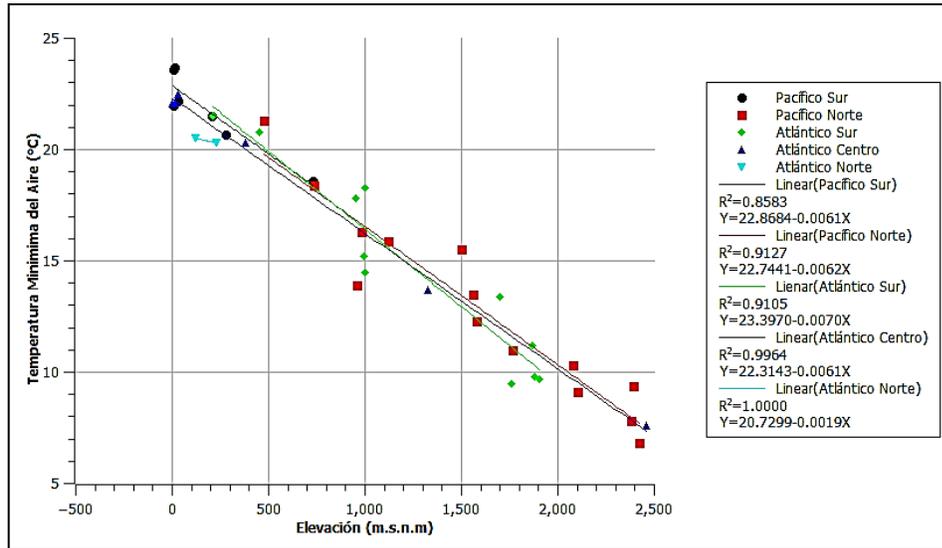
Fuente: elaboración propia.

Figura 35. Comportamiento entre la temperatura promedio del aire y la elevación



Fuente: elaboración propia.

Figura 36. Comportamiento entre la temperatura mínima del aire y la elevación

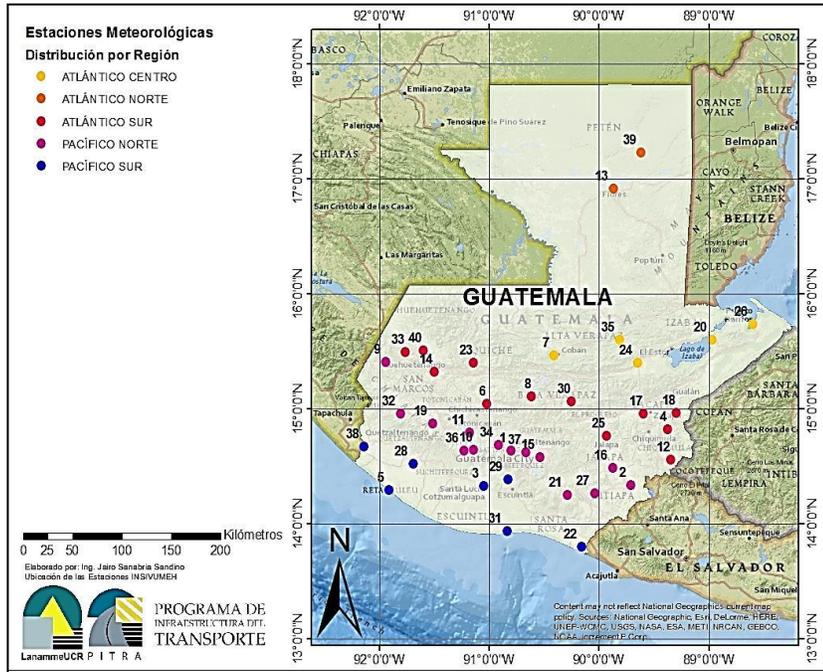


Fuente: elaboración propia.

6.2. Modelos de grados de desempeño PG en función de la zona

Los modelos de grado de desempeño se basan en los datos de las temperaturas máximas, promedios y mínimas del pavimento y la elevación de cada una de las estaciones meteorológicas. Los modelos de grado de desempeño estarán en función de la elevación (msnm). En el mapa siguiente se muestra cada una de las estaciones meteorológicas según la región donde se ubican.

Figura 37. Estaciones meteorológicas y ubicación de las regiones



Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, elaborado por el Ing. Jairo Sanabria Sandino.

Los modelos se generaron correlacionando los datos de temperaturas máximas, promedios y mínimas del pavimento a los niveles de confianza establecidos con la variable elevación para las zonas de Atlántico norte, Atlántico centro, Atlántico sur, Pacífico de norte y Pacífico del sur. Con estos resultados se obtuvieron las ecuaciones que determinarán el grado de desempeño en función de la elevación. A continuación se presenta cada una de las estaciones utilizadas con la elevación, temperatura de aire a 50 y 85 % de confianza, temperaturas del pavimento calculados por SHRP y LTPP a 50 y 85 % de confianza.

Tabla XX. Resultados obtenidos de las temperaturas máximas del aire y temperaturas del pavimento por SHRP y LTPP

ATLÁNTICO NORTE									
ESTACIÓN METEOROLÓGICA	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	TEMP MAX AIRE (°C)	σ	AIRE		SHRP		LTPP	
				NIVEL DE CONF		NIVEL DE CONF		NIVEL DE CONF	
				50 %	85 %	50 %	85 %	50 %	85 %
FLORES AEROPUERTO	123	32,53	0,51	32,53	33,06	59,03	59,57	53,95	57,09
TIKAL PETÉN	230	32,66	0,47	32,66	33,15	59,2	59,17	54,02	57,16
ATLÁNTICO CENTRO									
ESTACIÓN METEOROLÓGICA	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	TEMP MAX AIRE (°C)	σ	AIRE		SHRP		LTPP	
				NIVEL DE CONF		NIVEL DE CONF		NIVEL DE CONF	
				50 %	85 %	50 %	85 %	50 %	85 %
COBÁN	1 323	25,60	0,39	25,60	26,00	52,06	52,46	48,56	51,79
LAS VEGAS PHC	10	32,28	0,70	32,28	33,01	58,75	59,48	53,86	57,03
PANZÓS PHC ALTA VERAPAZ	30	32,41	0,27	32,41	32,86	58,87	59,14	53,97	57,09
PUERTO BARRIOS PHC	2	30,19	0,46	30,19	30,66	56,66	57,13	52,22	53,35
SANTA MARÍA CAHABÓN	380	26,18	0,40	26,18	26,60	52,65	53,06	49,11	52,23
TODOS SANTOS	2 460	18,79	0,67	18,79	19,48	45,26	45,95	43,35	46,51
ATLÁNTICO SUR									
ESTACIÓN METEOROLÓGICA		TEMP MAX AIRE (°C)	σ	AIRE		SHRP		LTPP	
				NIVEL DE CONF		NIVEL DE CONF		NIVEL DE CONF	
				50 %	85 %	50 %	85 %	50 %	85 %
CAMOTÁN	450	32,17	0,52	32,17	32,63	58,61	59,14	53,84	56,97
CHINIQUE	1 880	23,52	0,70	23,52	24,25	49,96	50,69	47,07	50,23
CUBULCO	994	30,25	0,82	30,25	31,10	56,70	57,55	52,31	55,50
ESQUIPULAS	950	27,14	0,62	27,14	27,78	53,56	54,20	49,93	53,08
HUEHUETENANGO	1 870	25,87	0,69	25,87	26,58	52,33	53,04	48,88	52,04
LA FRAGUA	210	33,89	0,69	33,89	34,61	60,33	61,05	55,16	58,33
LA UNIÓN	1 000	27,13	0,47	27,13	27,62	53,57	54,06	49,89	53,02
NEBAJ	1 906	23,00	0,70	23,00	23,70	49,46	50,19	46,63	49,80
POTRERO CARRILLO	1 760	21,89	0,68	21,89	22,60	48,32	49,03	45,82	48,98
SAN JERÓNIMO R.H	1 000	29,29	0,74	29,29	30,06	55,74	56,51	51,57	54,74
SAN PEDRO NECTA	1 700	21,63	0,34	21,63	21,98	48,09	48,44	45,56	48,68

Continuación de la tabla XX.

PACÍFICO NORTE									
ESTACIÓN METEOROLÓGICA	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	TEMP MAX AIRE (°C)	σ	AIRE		SHRP		LTPP	
				NIVEL DE CONF		NIVEL DE CONF		NIVEL DE CONF	
				50 %	85 %	50 %	85 %	50 %	85 %
ALAMEDA ICTA	1 766	23,72	0,27	23,72	24,00	50,15	50,42	47,26	50,38
ASUNCIÓN MITA R.H.	478	33,34	0,24	33,34	33,60	59,75	60,01	54,78	57,90
CUILCO	1 120	30,39	0,42	30,39	30,82	56,85	57,28	52,40	55,53
EL CAPITÁN	1 562	25,14	0,40	25,14	25,55	51,56	51,98	48,36	51,49
EL TABLÓN	2 392	20,91	0,45	20,91	21,37	47,35	47,81	45,05	48,19
INSIVUMEH	1 502	25,64	0,29	25,64	25,94	52,06	52,36	48,76	51,88
LA CEIBITA	960	30,14	0,31	30,14	30,46	56,56	56,88	52,28	55,40
LABOR OVALLE	2 380	22,49	0,48	22,49	22,99	48,93	49,43	46,28	49,42
LOS ESCLAVOS	737	30,99	0,34	30,99	31,35	57,40	57,46	52,96	56,08
QUEZADA	980	29,13	0,31	29,13	29,46	55,54	55,87	51,51	54,63
SANTA CRUZ BALANYÁ	2 080	24,10	0,52	24,10	24,63	50,53	51,06	47,55	50,69
SAN MARCOS PHC	2 420	30,22	0,39	30,22	30,63	56,66	57,07	52,30	55,43
SANTIAGO ATITLÁN	1 580	29,52	0,44	29,52	29,98	55,95	56,40	51,78	54,91
SUIZA CONTENTA	2 105	24,14	0,64	24,14	24,81	50,56	51,23	47,58	50,74
PACÍFICO SUR									
ESTACIÓN METEOROLÓGICA	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	TEMP MAX AIRE (°C)	σ	AIRE		SHRP		LTPP	
				NIVEL DE CONF		NIVEL DE CONF		NIVEL DE CONF	
				50 %	85 %	50 %	85 %	50 %	85 %
CAMANTULUL	280	32,44	0,18	32,44	32,63	58,85	59,04	54,08	57,20
CHAMPERICO FEGUA	5	32,96	0,20	32,96	33,17	59,37	59,57	54,49	57,60
MONTÚFAR	15	33,74	0,19	33,74	33,93	60,12	60,31	55,13	58,24
RETALHULEU AEROPUERTO	205	33,48	0,27	33,48	33,76	59,90	60,18	54,88	58,00
SÁBANA GRANDE	730	23,22	0,28	23,22	23,52	49,64	49,93	46,89	50,01
SAN JOSÉ AEROPUERTO	6	32,87	0,46	32,87	33,34	59,26	59,72	54,44	57,57
TECÚN UMÁN FEGUA AYUTLA	28	27,00	0,34	27,00	27,35	53,43	53,78	49,81	52,93

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Resultados obtenidos de las temperaturas mínimas del aire y temperaturas del pavimento por SHRP y LTPP**

ATLÁNTICO NORTE									
ESTACIÓN METEOROLÓGICA	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	TEMP MIN AIRE (°C)	σ	AIRE		SHRP		LTPP	
				NIVEL DE CONF		NIVEL DE CONF		NIVEL DE CONF	
				50 %	85 %	50 %	85 %	50 %	85 %
FLORES AEROPUERTO	123	20,53	2,70	20,53	17,73	21,84	19,04	22,71	19,74
TIKAL PETÉN	230	20,29	3,38	20,29	16,78	21,60	18,10	22,49	19,16
ATLÁNTICO CENTRO									
ESTACIÓN METEOROLÓGICA	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	TEMP MIN AIRE (°C)	σ	AIRE		SHRP		LTPP	
				NIVEL DE CONF		NIVEL DE CONF		NIVEL DE CONF	
				50 %	85 %	50 %	85 %	50 %	85 %
COBÁN	1 323	13,67	2,28	13,67	10,75	14,98	12,06	17,96	14,93
LAS VEGAS PHC	10	22,09	2,31	22,09	19,63	23,40	21,01	24,01	21,23
PANZÓS PHC ALTA VERAPAZ	30	22,46	2,18	22,46	20,20	23,78	21,51	24,30	21,58
PUERTO BARRIOS PHC	2	22,13	2,14	22,13	19,91	23,45	21,23	24,02	21,32
SANTA MARÍA CAHABON	380	20,27	2,34	20,27	17,85	21,59	19,16	22,70	19,91
TODOS SANTOS	2 460	7,60	2,37	7,60	5,14	8,92	6,46	13,59	10,78
ATLÁNTICO SUR									
ESTACIÓN METEOROLÓGICA	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	TEMP MIN AIRE (°C)	σ	AIRE		SHRP		LTPP	
				NIVEL DE CONF		NIVEL DE CONF		NIVEL DE CONF	
				50 %	85 %	50 %	85 %	50 %	85 %
CAMOTÁN	450	20,78	2,28	20,78	18,42	22,09	19,73	23,16	20,39
CHINIQUE	1 880	9,82	2,70	9,82	7,02	11,13	8,33	15,24	12,27
CUBULCO	994	15,19	3,24	15,19	11,83	16,50	13,14	19,10	15,84
ESQUIPULAS	950	17,77	2,13	17,77	15,56	19,08	16,88	21,02	18,33
HUEHUETENANGO	1 870	11,20	3,60	11,20	7,47	12,51	8,78	16,20	12,74
LA FRAGUA	210	21,45	2,44	21,45	18,92	22,76	20,13	23,62	20,79
LA UNIÓN	1 000	18,33	2,62	18,33	15,61	19,64	16,93	21,38	18,45
NEBAJ	1 906	9,69	5,00	9,69	4,51	11,00	5,82	15,10	10,78
POTRERO CARRILLO	1 760	9,49	4,41	9,49	4,92	10,80	6,24	15,04	11,09
SAN JERÓNIMO R.H	1 000	14,50	3,01	14,50	11,39	15,82	12,70	18,61	15,48
SAN PEDRO NECTA	1 700	13,39	2,15	13,39	11,15	14,70	12,47	17,75	15,05

Continuación de la tabla XXI.

PACÍFICO NORTE									
ESTACIÓN METEOROLÓGICA	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	TEMP MIN AIRE (°C)	σ	AIRE		SHRP		LTPP	
				NIVEL DE CONF		NIVEL DE CONF		NIVEL DE CONF	
				50 %	85 %	50 %	85 %	50 %	85 %
ALAMEDA ICTA	1 766	11,00	3,13	11,00	7,75	12,31	9,07	16,14	12,94
ASUNCIÓN MITA R.H.	478	21,29	1,66	21,29	19,57	22,60	20,88	23,58	21,08
CUILCO	1 120	15,85	2,85	15,85	12,89	17,16	14,21	19,54	16,49
EL CAPITÁN	1 562	13,48	2,26	13,48	11,45	14,79	12,76	17,92	15,30
EL TABLÓN	2 392	9,41	2,75	9,41	6,56	10,72	7,87	14,98	11,98
INSIVUMEH	1 502	15,53	1,97	15,53	13,49	16,84	14,80	19,41	16,78
LA CEIBITA	960	13,85	3,48	13,85	10,24	15,16	11,56	18,21	14,82
LABOR OVALLE	2 380	7,78	4,25	7,78	3,37	9,09	4,69	13,79	9,94
LOS ESCLAVOS	737	18,40	2,58	18,40	15,72	19,71	17,04	21,51	18,60
QUEZADA	980	131	2,19	16,31	14,04	17,62	15,35	20,00	17,28
SAN MARCOS PHC	2 420	6,75	2,31	6,75	4,36	8,07	5,68	13,04	10,27
SANTA CRUZ BALANYÁ	2 080	10,30	2,61	10,30	7,59	11,61	8,90	15,63	12,70
SANTIAGO ATITLÁN	1 580	12,29	2,85	12,29	9,34	13,60	10,65	17,07	14,02
SUIZA CONTENTA	2 105	9,13	2,80	9,13	6,22	10,44	7,54	14,79	11,77
PACÍFICO SUR									
ESTACIÓN METEOROLÓGICA	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	TEMP MIN AIRE (°C)	σ	AIRE		SHRP		LTPP	
				NIVEL DE CONF		NIVEL DE CONF		NIVEL DE CONF	
				50 %	85 %	50 %	85 %	50 %	85 %
CAMANTULUL	280	20,71	1,80	20,71	18,84	22,02	20,16	23,7	20,61
CHAMPERICO FEGUA	5	23,56	1,87	23,56	21,62	24,87	22,94	25,22	22,64
MONTÚFAR	15	23,67	1,54	23,67	22,07	24,98	23,39	25,36	22,90
RETALHULEU AEROPUERTO	205	21,50	1,13	21,50	20,33	22,81	21,64	23,71	21,38
SÁBANA GRANDE	730	18,64	2,25	18,64	16,30	19,95	17,62	21,67	18,92
SAN JOSÉ AEROPUERTO	6	21,96	2,07	21,96	19,81	23,27	21,12	24,11	21,44
TECÚN UMÁN FEGUA AYUTLA	28	22,16	1,50	22,16	20,60	23,47	21,92	24,17	21,72

Continuación de la tabla XXI.

ATLÁNTICO NORTE			
BASE DE DATOS TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	MODELOS TEMP MÁX DEL AIRE (°C)	CONFIABILIDAD	
		50	85
		$Y=32,2701+0,0019X$	$Y=32,8850+0,0009X$
	R^2	1	1
	MODELOS SHRP (°C)	CONFIABILIDAD	
		50	85
		$Y=58,8691+0,0013X$	$Y=59,3850+0,0009X$
	R^2	1	1
	MODELOS LTPP(°C)	CONFIABILIDAD	
50		85	
$Y=50,6950+0,0009X$		$Y=51,2510+0,0006X$	
R^2	1	1	
BASE DE DATOS TEMPERATURA MÍNIMA (°C)	MODELOS TEMP MÍN DEL AIRE (°C)	CONFIABILIDAD	
		50	85
		$Y=20,7299-0,0019X$	$Y=18,8346-0,0084X$
	R^2	1	1
	MODELOS SHRP (°C)	CONFIABILIDAD	
		50	85
		$Y=22,1159-0,0022X$	$Y=23,9252+0,0047X$
	R^2	1	1
	MODELOS LTPP(°C)	CONFIABILIDAD	
50		85	
$Y=22,9284-0,0018X$		$Y=24,8467+0,0046$	
R^2	1	1	
ATLÁNTICO CENTRO			
BASE DE DATOS TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	MODELOS TEMP MÁX DEL AIRE (°C)	CONFIABILIDAD	
		50	85
		$Y=31,0256-0,0049X$	$Y=31,4546-0,0048X$
	R^2	0,8916	0,8850
	MODELOS SHRP (°C)	CONFIABILIDAD	
		50	85
		$Y=57,4802-0,0049X$	$Y=57,9074-0,0040X$
	R^2	0,8919	0,8851
	MODELOS LTPP(°C)	CONFIABILIDAD	
50		85	
$Y=49,7520-0,0038X$		$Y=50,1854-0,0038X$	
R^2	0,8889	0,8832	
BASE DE DATOS TEMPERATURA MÍNIMA (°C)	MODELOS TEMP MÍN DEL AIRE (°C)	CONFIABILIDAD	
		50	85
		$Y=22,3143-0,0016X$	$Y=20,0404-0,0062X$
	R^2	0,9964	0,9932
	MODELOS SHRP (°C)	CONFIABILIDAD	
		50	85
		$Y=23,6170-0,0061X$	$Y=25,8935-0,0060X$
	R^2	0,9964	0,9983
	MODELOS LTPP(°C)	CONFIABILIDAD	
50		85	
$Y=24,1723-0,0044X$		$Y=26,4455-0,0042X$	
R^2	0,9973	0,9982	
ATLÁNTICO SUR			
BASE DE DATOS TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	MODELOS TEMP MÁX DEL AIRE (°C)	CONFIABILIDAD	
		50	85
	$Y=34,8150-0,0064X$	$Y=35,4443-0,0063X$	
	R^2	0,8642	0,8342
MODELOS SHRP (°C)	CONFIABILIDAD		
50	85		

Continuación de la tabla XXI.

		$Y=61,2340-0,0063X$	$Y=61,8361-0,0063X$
	R^2	0,8480	0,8311
	MODELOS LTPP(°C)	CONFIABILIDAD	
		50	85
	$Y=52,7394-0,0050X$	$Y=53,3679-0,0050X$	
R^2	0,8539	0,8333	
BASE DE DATOS TEMPERATURA MÍNIMA (°C)	MODELOS TEMP MÍN DEL AIRE (°C)	CONFIABILIDAD	
		50	85
		$Y=23,3970-0,0070X$	$Y=21,4257-0,0078X$
	R^2	0,9105	0,8656
	MODELOS SHRP (°C)	CONFIABILIDAD	
		50	85
		$Y=24,6774-0,0070X$	$Y=26,6223-0,0061X$
	R^2	0,9099	0,9199
	MODELOS LTPP(°C)	CONFIABILIDAD	
		50	85
		$Y=25,0289-0,0050X$	$Y=26,9677-0,0041X$
	R^2	0,9116	0,9105
PACÍFICO NORTE			
BASE DE DATOS TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	MODELOS TEMP MÁX DEL AIRE (°C)	CONFIABILIDAD	
		50	85
		$Y=34,1554-0,0045X$	$Y=34,3925-0,0044X$
	R^2	0,5780	0,5653
	MODELOS SHRP (°C)	CONFIABILIDAD	
		50	85
		$Y=60,5937-0,0045X$	$Y=60,8367-0,0044X$
	R^2	0,5771	0,5638
	MODELOS LTPP(°C)	CONFIABILIDAD	
		50	85
		$Y=52,3306-0,0035X$	$Y=52,5529-0,0034X$
	R^2	0,5840	0,5684
BASE DE DATOS TEMPERATURA MÍNIMA (°C)	MODELOS TEMP MÍN DEL AIRE (°C)	CONFIABILIDAD	
		50	85
		$Y=22,7441-0,0062X$	$Y=20,6588-0,0066X$
	R^2	0,9127	0,8380
	MODELOS SHRP (°C)	CONFIABILIDAD	
		50	85
		$Y=24,0366-0,0062X$	$Y=26,1033-0,0058X$
	R^2	0,9108	0,9302
	MODELOS LTPP(°C)	CONFIABILIDAD	
		50	85
		$Y=24,6201-0,0045X$	$Y=26,6804-0,0041X$
	R^2	0,9114	0,9285

Continuación de la tabla XXI.

PACÍFICO SUR			
BASE DE DATOS TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	MODELOS TEMP MÁX DEL AIRE (°C)	CONFIABILIDAD	
		50	85
		$Y=32,7812-0,0108X$	$Y=33,0496-0,0108X$
	R^2	0,5010	0,5039
	MODELOS SHRP (°C)	CONFIABILIDAD	
		50	85
		$Y=59,1714-0,0108X$	$Y=59,4705-0,0109X$
	R^2	0,4982	0,5112
	MODELOS LTPP(°C)	CONFIABILIDAD	
50		85	
$Y=51,2347-0,0084X$		$Y=51,5183-0,0085X$	
R^2	0,4968	0,5088	
BASE DE DATOS TEMPERATURA MÍNIMA (°C)	MODELOS TEMP MÍN DEL AIRE (°C)	CONFIABILIDAD	
		50	85
		$Y=22,8684-0,0061X$	$Y=21,2161-0,0066X$
	R^2	0,8583	0,8428
	MODELOS SHRP (°C)	CONFIABILIDAD	
		50	85
		$Y=24,1436-0,0060X$	$Y=25,7466-0,0054X$
	R^2	0,8538	0,7997
	MODELOS LTPP(°C)	CONFIABILIDAD	
50		85	
$Y=24,7184-0,004X$		$Y=26,3442-0,0038X$	
R^2	0,8444	0,7412	

Fuente: elaboración propia.

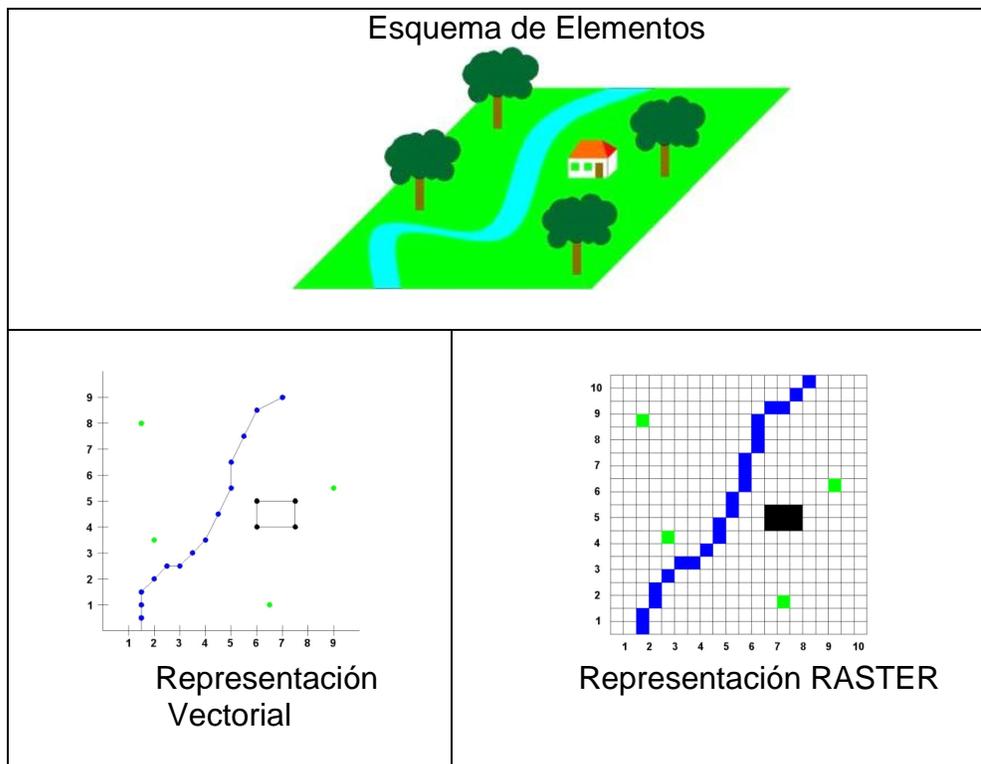
En la sección de anexos se detallan las gráficas que correlacionan las temperaturas del aire y pavimento, con la variable elevación a diferentes niveles de confiabilidad.

6.3. Metodología ArcGIS para obtener los mapas de PG

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son sistemas o programas de cómputo que permiten relacionar información geográfica con características en una base de datos. Normalmente los SIG emplean los sistemas de coordenadas para definir la ubicación espacial. La representación gráfica usa dos tipos de salida para los datos, la primera consiste en el uso de vectores (puntos, líneas y polígonos) y el segundo tipo de representación es mediante el

uso de ráster (arreglos matriciales), la figura siguiente muestra en forma simplificada un ejemplo.

Figura 38. **Tipos de representación mediante SIG**

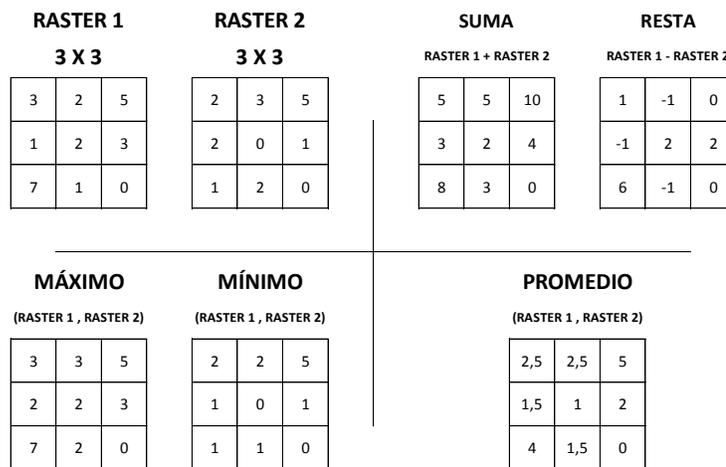


Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, elaborado por el Ing. Jairo Sanabria Sandino.

Cada tipo de representación permite analizar diversos fenómenos y están relacionados con una tabla de atributos o un atributo específico. En el caso particular del ráster equivale a una estructura de rejilla rectangular donde cada rejilla posee un valor, color o atributo, el cual es empleado para representar un fenómeno particular con una ubicación espacial específica. La característica matricial del ráster permite el uso de ecuaciones, su combinación mediante

superposición de otras matrices equivalentes en tamaño y ubicación, un ejemplo de operaciones mediante ráster se muestra en la siguiente figura.

Figura 39. **Ejemplo de operación empleado superposición de Raster**



Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, elaborado por el Ing. Jairo Sanabria Sandino.

El uso del análisis espacial, permite utilizar ecuaciones que generan resultados en una distribución continua o área de interés. Empleando elementos tipo ráster, se pueden distribuir espacialmente los distintos componentes de una ecuación y mediante herramientas de análisis espacial se pueden multiplicar constantes, sumar o restar componentes, lo cual equivale a la aplicación de ecuaciones en una matriz, donde el resultado final equivale a un ráster que resume los resultados y los distribuye espacialmente. Para efectos de este proyecto de graduación, se busca establecer relaciones entre la temperatura del aire máxima (mínima) con la temperatura del pavimento máxima (mínima). La parte restante consiste en generar los distintos

componentes de la ecuación empleando un ráster para cada componente según sea el caso, las ecuaciones son:²⁶

- Ecuaciones generales - temperatura máxima del pavimento

- Temperatura máxima - modelo SHRP :

$$T_{m\acute{a}x\ p\acute{a}v} = (T_{m\acute{a}x\ aire} - 0,00618 \cdot Lat^2 + 0,2289 \cdot Lat + 24,4) \cdot (1 - 0,063 \cdot H + 0,007 \cdot H^2 - 0,0004 \cdot H^3) + z \cdot \sigma_{aire}$$

- Temperatura máxima - modelo LTPP:

$$T_{m\acute{a}x\ p\acute{a}v} = 54,32 + 0,78 \cdot T_{m\acute{a}x\ aire} - 0,0025 \cdot Lat^2 + 15,14 \cdot \log_{10}(H + 25) + z \cdot (9 + 0,61 \cdot \sigma_{aire}^2)^{1/2}$$

Las variables derivadas de los dos modelos de cálculo de la temperatura máxima del pavimento son:

$T_{m\acute{a}x\ p\acute{a}v}$: temperatura máxima del pavimento a cierta profundidad, en grados centígrados ==> ráster.

$T_{m\acute{a}x\ aire}$: temperatura máxima del aire, en grados centígrados ==> ráster.

Lat : latitud en la sección de interés, en grados decimales ==> ráster.

H : profundidad desde la superficie, en milímetros.

²⁶ Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica.

σ_{aire} : desviación estándar de los siete días más calientes, en grados centígrados ==> ráster.

z : valor z derivado de la tabla de distribución normal estándar, en función del nivel de confianza.

- Ecuaciones generales - temperatura mínima del pavimento

- Temperatura mínima - modelo SHRP:

$$T_{min\ pav} = T_{min\ air} + 0,051 \cdot H - 0,000063 \cdot H^2 - z \cdot \sigma_{aire}$$

- Temperatura mínima - modelo LTPP:

$$T_{min\ pav} = -1,56 + 0,72 \cdot T_{min\ air} - 0,004 \cdot Lat^2 + 6,26 \cdot \log_{10}(H + 25) - z \cdot (4,4 + 0,52 \cdot \sigma_{aire}^2)^{1/2}$$

Las variables derivadas de los dos modelos de cálculo de la temperatura mínima del pavimento son:

$T_{min\ pav}$: temperatura mínima del pavimento a cierta profundidad, en grados centígrados ==> ráster.

$T_{min\ aire}$: temperatura mínima del aire, en grados centígrados ==> ráster.

Lat : latitud de la sección, en grados decimales ==> ráster.

H : profundidad desde la superficie, en milímetros.

σ_{aire} : distribución estándar de la temperatura mínima del aire, en grados centígrados ==> ráster.

z : valor z derivado de la tabla de distribución normal estándar, en función del nivel de confianza.

7. PROPUESTA DE ZONIFICACIÓN POR GRADO DE DESEMPEÑO

7.1. Introducción

Para presentar la propuesta de zonificación por grado de desempeño, primero se recopilaron los datos de las temperaturas máximas, promedios y mínimas de las estaciones meteorológicas activas del país, durante un período de 5 años (2009 - 2013). Posteriormente, se calcularon las temperaturas del pavimento por medio de los modelos SHRP y LTPP. Con los resultados obtenidos de las temperaturas máximas y mínimas del pavimento por ambos modelos, se procede a determinar las zonas para el desarrollo de modelos PG según su elevación. Se debe utilizar la metodología del programa ArcGIS para obtener los mapas de PG, y así hacer la propuesta de zonificación por grado de desempeño.

Los elementos requeridos para establecer los límites de las zonas de acuerdo al grado de desempeño son:

- Mapas de grado de desempeño del país
- Densidad de carreteras en el país
- Distribución poblacional de los departamentos del país
- Efectos de velocidad de carga en la selección del ligante asfáltico

Debido a que no se cuenta con información actualizada sobre la densidad de carreteras en el país, tipos de carreteras, cargas que circulan en las carreteras, no se puede relacionar con la demografía de cada departamento,

Como consecuencia, para esta investigación únicamente se trabajó con temperaturas máximas y mínimas de cada departamento, de las cuarenta estaciones meteorológicas que contaban con registros diarios del período de 2009 - 2013.

7.1.1. Modelo de grado de desempeño en Guatemala

El modelo de grado de desempeño en Guatemala se realizará con base en los datos climáticos (temperatura del aire), obtenidas de las 40 estaciones meteorológicas del Insivumeh, las ecuaciones de predicción de la temperatura del pavimento, que son los sistemas SHRP y LTPP los que definen el tipo de ecuación basado en los estudios teóricos y experimentales, y la utilización del ArcGIS para desarrollar mapas basados en los modelos de grados de desempeño (grados centígrados) en función de la elevación (metros sobre el nivel del mar).

7.2. Zonificación propuesta

Es la distribución por departamentos utilizando los diferentes PG al 50 % y 85 % de confiabilidad. En el apartado de anexos se muestra la zonificación propuesta del 98 % de confiabilidad.

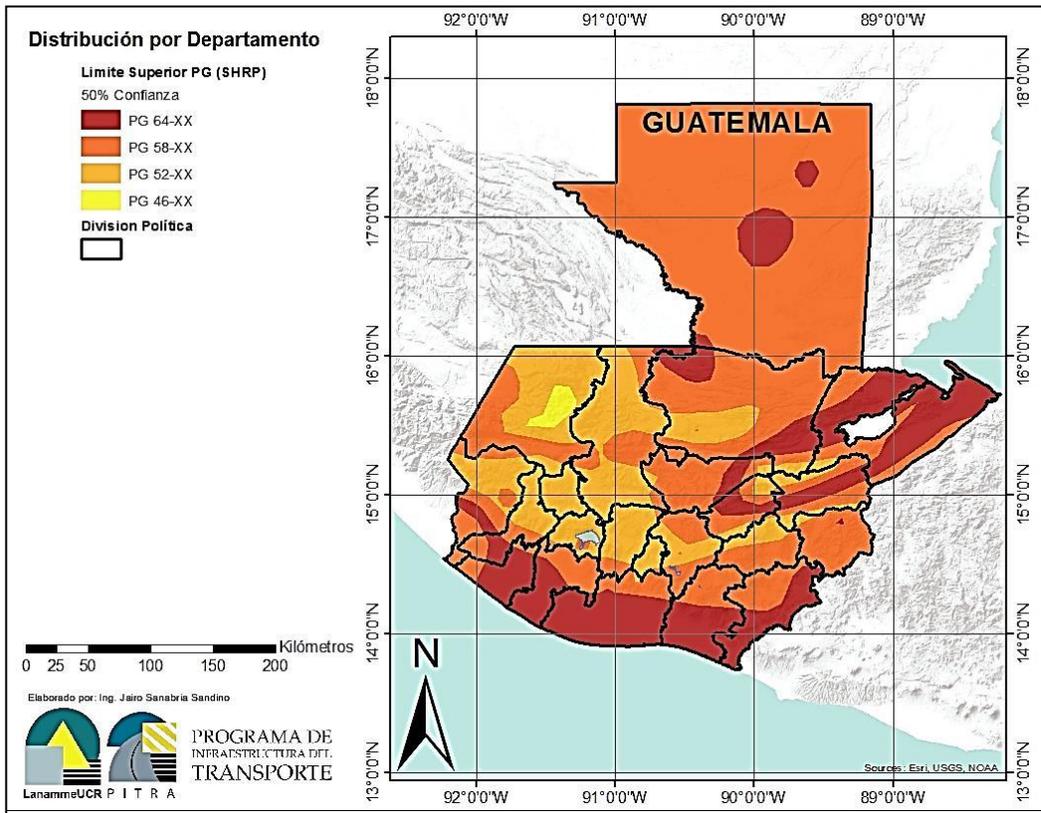
A continuación se presenta el PG recomendado por departamento con el porcentaje de cada uno de los PG utilizados; así como el mapa de distribución por departamento al 50 % y 85 % de confiabilidad.

Tabla XXII. **PG recomendado a un nivel de confiabilidad de 50 %**

Departamento	Área (km ²)	PG 52-XX	PG 58-XX	PG 64-XX	PG recomendado
ALTA VERAPAZ	10 614,23	17,1 %	65,1 %	17,8 %	PG 64-22(25)
BAJA VERAPAZ	3 021,50	5,9 %	78,3 %	15,8 %	PG 58-22(22)
CHIMALTENANGO	1 864,93	80,8 %	19,2 %	0,0 %	PG 58-22(22)
CHIQUMULA	2 408,42	6,3 %	92,5 %	1,2 %	PG 58-22(22)
EL PROGRESO	1 838,28	23,6 %	44,7 %	31,7 %	PG 64-22(25)
ESCUINTLA	4 507,34	1,2 %	20,0 %	78,7 %	PG 64-22(25)
GUATEMALA	2 207,77	41,6 %	58,4 %	0,0 %	PG 58-22(22)
HUEHUETENANGO	7 360,78	55,7 %	35,1 %	0,0 %	PG 58-22(22)
IZABAL	7 518,94	2,1 %	28,6 %	69,3 %	PG 64-22(25)
JALAPA	2 034,20	32,0 %	68,0 %	0,0 %	PG 58-22(22)
JUTIAPA	3 320,02	0,0 %	40,7 %	59,3 %	PG 64-22(25)
PETÉN	35 999,76	0,0 %	94,4 %	5,6 %	PG 58-22(22)
QUETZALTENANGO	2 132,48	50,4 %	32,4 %	17,2 %	PG 64-22(25)
QUICHÉ	7 283,07	69,2 %	27,9 %	2,8 %	PG 58-22(22)
RETALHULEHU	1 700,15	0,0 %	22,6 %	77,4 %	PG 64-22(25)
SACATÉPEQUEZ	536,55	94,5 %	5,5 %	0,0 %	PG 58-22(22)
SAN MARCOS	3 551,10	44,9 %	44,7 %	10,4 %	PG 58-22(22)
SANTA ROSA	3 164,56	0,0 %	38,2 %	61,8 %	PG 64-22(25)
SOLOLÁ	1 167,13	86,5 %	13,5 %	0,0 %	PG 58-22(22)
SUCHITEPÉQUEZ	2 393,52	1,4 %	43,9 %	54,7 %	PG 64-22(25)
TOTONICAPÁN	1 076,37	99,0 %	1,0 %	0,0 %	PG 58-22(22)
ZACAPA	2 707,45	22,0 %	46,1 %	31,9 %	PG 64-22(25)

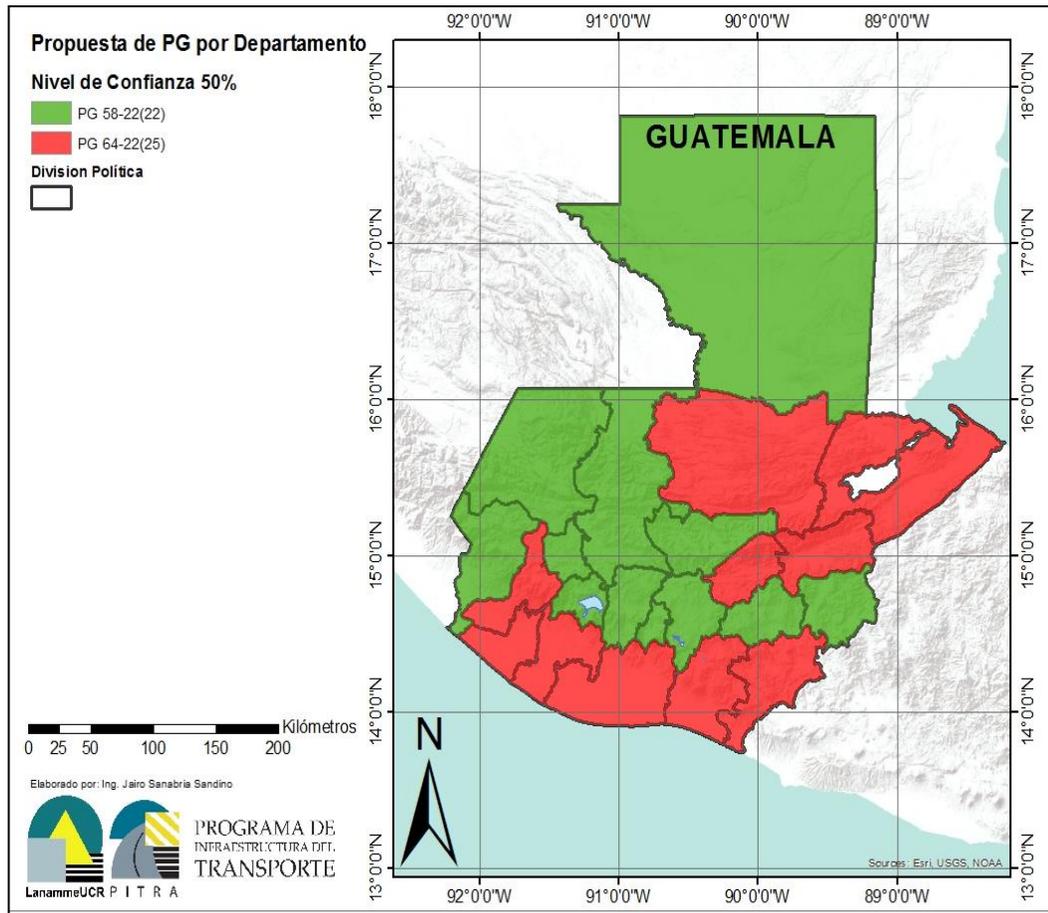
Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, elaborado por el Ing. Jairo Sanabria Sandino.

Figura 40. **Distribución por departamento de PG a 50 % de confiabilidad**



Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, elaborado por el Ing. Jairo Sanabria Sandino.

Figura 41. Propuesta de PG por departamento a un 50 % de confiabilidad



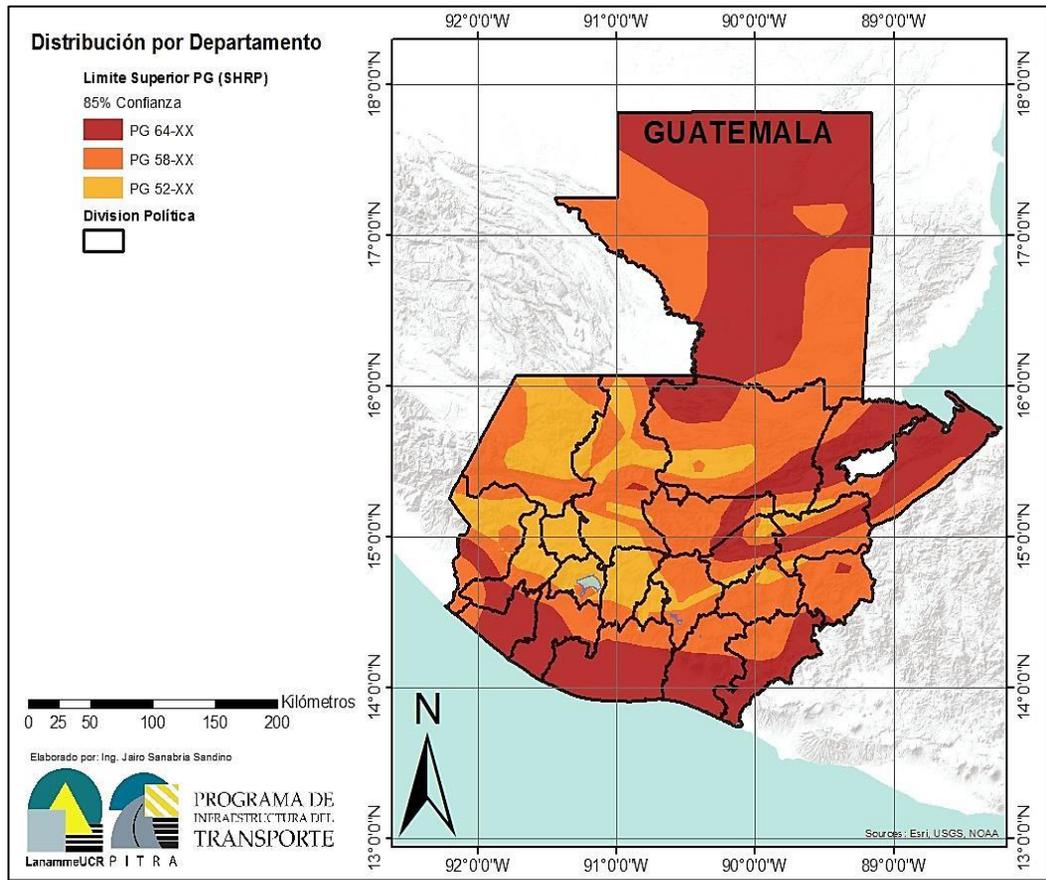
Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, elaborado por el Ing. Jairo Sanabria Sandino.

Tabla XXIII. **PG recomendado a un nivel de confiabilidad de 85 %**

Departamento	Área (km ²)	PG 52-XX	PG 58-XX	PG 64-XX	PG recomendado
ALTAVERAPAZ	10 614,23	13,2 %	59,9 %	27,0 %	PG 64-22(25)
BAJA VERAPAZ	3 021,50	3,0 %	77,7 %	19,2 %	PG 64-22(25)
CHIMALTENANGO	1 864,93	73,2 %	26,8 %	0,0 %	PG 58-22(22)
CHIQUIMULA	2 408,42	1,7 %	92,1 %	6,2 %	PG 58-22(22)
EL PROGRESO	1 838,28	17,0 %	45,1 %	37,9 %	PG 64-22(25)
ESCUINTLA	4 507,34	0,4 %	19,4 %	80,2 %	PG 64-22(25)
GUATEMALA	2 207,77	21,4 %	78,6 %	0,1 %	PG 58-22(22)
HUEHUETENANGO	7 360,78	51,3 %	48,7 %	0,0 %	PG 58-22(22)
IZABAL	7 518,94	1,7 %	23,6 %	74,6 %	PG 64-22(25)
JALAPA	2 034,20	11,4 %	88,6 %	0,0 %	PG 58-22(22)
JUTIAPA	3 320,02	0,0 %	37,0 %	63,0 %	PG 64-22(25)
PETÉN	35 999,76	0,0 %	37,2 %	62,8 %	PG 64-22(25)
QUETZALTENANGO	2 132,48	48,1 %	30,8 %	21,1 %	PG 64-22(25)
QUICHÉ	7 283,07	45,3 %	49,9 %	4,8 %	PG 58-22(22)
RETALHULEHU	1 700,15	0,0 %	18,2 %	81,8 %	PG 64-22(25)
SACATÉPEQUEZ	536,55	81,6 %	18,4 %	0,0 %	PG 58-22(22)
SAN MARCOS	3 551,10	38,2 %	47,4 %	14,4 %	PG 58-22(22)
SANTA ROSA	3 164,56	0,0 %	33,9 %	66,1 %	PG 64-22(25)
SOLOLÁ	1 167,13	76,3 %	23,7 %	0,0 %	PG 58-22(22)
SUCHITEPEQUEZ	2 393,52	0,6 %	40,2 %	59,3 %	PG 64-22(25)
TOTONICAPÁN	1 076,37	98,3 %	1,7 %	0,0 %	PG 58-22(22)
ZACAPA	2 707,45	12,0 %	51,9 %	36,1 %	PG 64-22(25)

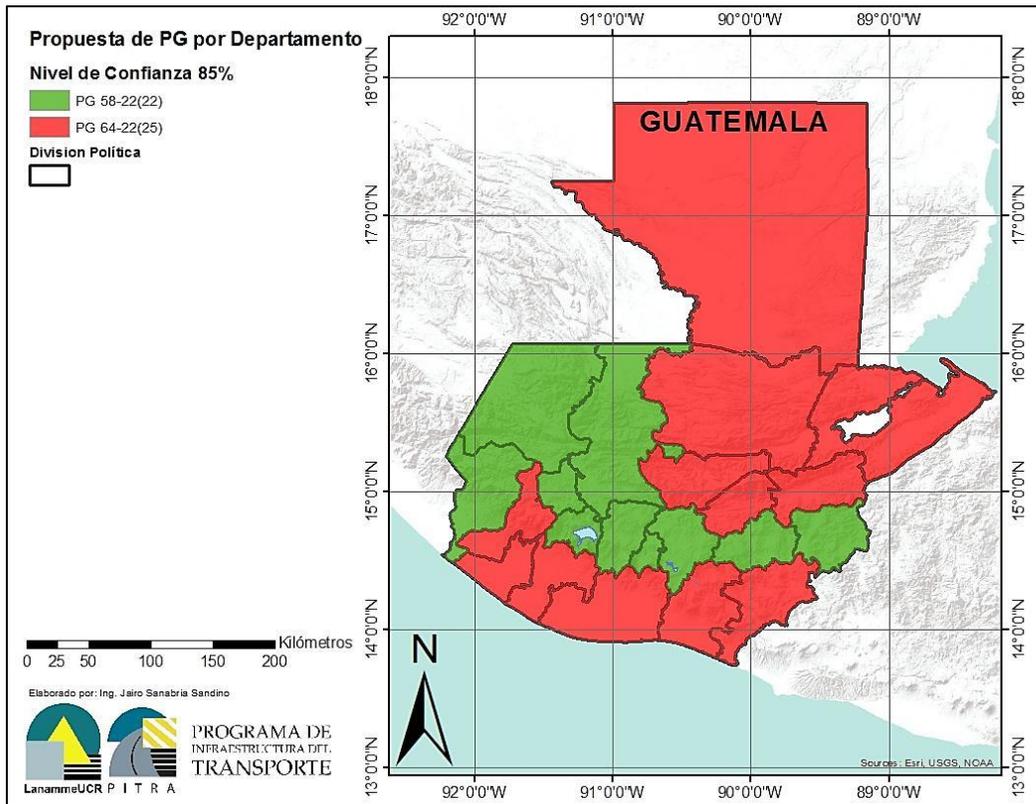
Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, elaborado por el Ing. Jairo Sanabria Sandino.

Figura 42. Distribución por departamento de PG a 85 % de confiabilidad



Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, elaborado por el Ing. Jairo Sanabria Sandino.

Figura 43. **Propuesta de PG por departamento a un 85 % de confiabilidad**



Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, elaborado por el Ing. Jairo Sanabria Sandino.

8. DETERMINACIÓN DEL TIPO DE CEMENTO ASFÁLTICO SEGÚN EL GRADO DE DESEMPEÑO

Como se mencionó anteriormente Perenco, la principal productora local de asfalto, fabrica diferentes tipos de ligantes asfálticos. Se tuvo acceso a los diferentes productos que fabrican y estas muestras fueron enviadas al Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR), quienes realizaron la caracterización de acuerdo a grado PG. Las muestras de AC-5, AC-10 y AC-40 fueron elaboradas en el laboratorio, debido a que no cuentan con la suficiente demanda para tener una producción constante.

La caracterización PG de una muestra de asfalto consiste en el desarrollo de los siguientes ensayos:

- Ensayo de reómetro de corte directo: sirve para conocer las propiedades visco-elásticas de los ligantes asfálticos.
- Ensayo de película delgada: simula el envejecimiento del asfalto que ocurre en la planta durante la elaboración de la mezcla asfáltica.
- Ensayo de envejecimiento a presión: el propósito es evaluar el envejecimiento durante largos períodos de servicio.
- Ensayo de tracción directa: mide directamente la deformación a la falla a muy bajas temperaturas.

Los resultados de la caracterización se presentan a continuación:

Tabla XXIV. **Resultados de la caracterización de las muestras de asfalto**

Muestra	M-2301-14		M-2303-14		M-2302-14		M-2304-14		M-2305-14	
Descripción	AC-5 Virgen Perenco		AC-10 Virgen Perenco		AC-20 Virgen Perenco		AC-30 Virgen Perenco		AC-40 Virgen Perenco	
Temperatura (°C)	PG Original (kPa)									
52	1.89893									
58	0.881389		1.63915							
64			0.809882		1.27198				1.93246	
70					0.633349		1.34697		0.973774	
76							0.672928			
Cambio masa en RTFO (%)	2.272		1.647		0.959		0.797		0.606	
Temperatura (°C)	PG RTFO (kPa)									
58	3.45049				2.64556					
64	1.64484		3.13865		1.29859					
70			1.51393				3.18955		4.49758	
76							1.57915		2.19067	
Temperatura (°C)	PG PAV (MPa)									
13	5.45886									
16	3.68345		4.96459		5.99219					
19			3.67401		4.19586		6.74729			
22							4.88895		5.33761	
25									3.90442	
Temperatura (°C)	BBR									
	s (Mpa)	m	s (Mpa)	m	s (Mpa)	m	s (Mpa)	m	s (Mpa)	m
-16							40.5306	0.437935	35.1015	0.452538
-22	33.9535	0.437163	56.6493	0.432924	76.5234	0.406674	79.2277	0.406282	80.4383	0.390382
-28	296.4558	0.26307	80.5937	0.378581	141.1417	0.363541	183.5683	0.371737	281.3685	0.361734
-34	342.737	0.295992	234.5836	0.305699	267.6123	0.309142	391.5378	0.2778061	517.8466	0.251371

Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, elaborado por el Ing. Jairo Sanabria Sandino.

Obtenidos los resultados se procede a la clasificación por PG. Por ejemplo, para la muestra de asfalto de AC-10 y AC-20, en la tabla IV se muestran las especificaciones Superpave para ligantes asfálticos con las que se debe cumplir. Para la muestra de AC-10, en el ensayo de reómetro de corte directo el requerimiento indica que debe cumplir con 1,00 kPa mínimo. La muestra de asfalto obtuvo un resultado de 0,80988 kPa a una temperatura de 64 °C, eso quiere decir que no cumple con lo mínimo. Mientras que a 58 °C el resultado fue de 1,6391 kPa, cumpliendo con el requisito. En cuanto al cambio

de masa la especificación indica que debe de ser mínimo de 1 % y el resultado es de 1,647 por lo que es aceptable.

Una de las principales razones es porque como ya se explicó anteriormente, esta muestra fue fabricada en el laboratorio y no es una muestra de producción. En el ensayo de la película delgada en el horno giratorio, el requerimiento indica que debe de ser mínimo de 2,2 kPa. El resultado obtenido de la muestra es de 3,1386 kPa, por consiguiente es aprobada. En el ensayo de envejecimiento a presión el requerimiento indica que no debe exceder los 5,000 kPa, 4,96459 kPa es el resultado de la muestra de asfalto en este ensayo. Por último, el ensayo de tracción directa indica que resultado debe de ser mínima de 0,300 y máximo de 300 MPa. El resultado demuestra que obtuvo un mínimo de 0,3056 y un máximo de 234,5836 MPa. Debido a que la muestra de AC-10 cumple los requisitos establecidos en la tabla IV, es válido caracterizarla como un PG 58-34.

Para la muestra de AC-20, en el ensayo de reómetro de corte directo el requerimiento indica que debe cumplir con 1,00 kPa mínimo. La muestra obtuvo un resultado de 1,27198 kPa a una temperatura de 64 °C, eso quiere decir que sí cumple con lo mínimo. Pero al realizarlo a 70 °C, el resultado obtenido es de 0,6333 kPa, el cual no cumple con el mínimo. En cuanto al cambio de masa, la especificación indica que debe de ser mínimo de 1 % y el resultado es de 0,96 por lo que es aceptable. En el ensayo de la película delgada en el horno giratorio, el requerimiento indica que debe de ser mínimo de 2,2 kPa. El resultado obtenido de la muestra es de 2,6455 kPa, por consiguiente es aprobada. En el ensayo de envejecimiento a presión, el requerimiento indica que no debe exceder los 5,000 kPa, 4,195 kPa es el resultado de la muestra de asfalto en este ensayo. Por último, el ensayo de tracción directa indica que resultado debe de ser mínima de 0,300 y máximo de 300 MPa. El resultado

demuestra que obtuvo un mínimo de 0,3091 y un máximo de 267,61 MPa. Debido a que la muestra de AC-20 cumple los requisitos establecidos en la tabla IV, es válido caracterizarla como un PG 64-34.

CONCLUSIONES

1. El mapa del país de Guatemala realizado especifica la zonificación Atlántico y Pacífico, delimitadas cada una por la temperatura máxima y mínima del aire y luego del pavimento con el grado de desempeño requerido para el cemento asfáltico, donde se especifica el tipo de PG necesario para obtener el mejor rendimiento de la mezcla asfáltica.
2. Por medio de los resultados obtenidos, se concluye que el método LTPP es menos conservador que el método SHRP. SHRP es más exacto con respecto al valor de la temperatura máxima del pavimento.
3. Según los resultados obtenidos basados en el clima, en Guatemala se deberían utilizar 2 tipos de cemento asfáltico que, acuerdo al grado de desempeño, son clasificados como PG 58-34 y PG 64-34, equivalentes por viscosidad a AC-10 y AC-20. Es importante recordar que para la determinación del cemento asfáltico no se tomaron en cuenta las cargas de tránsito, debido a la falta de información que existe en país.
4. El uso del tipo de cemento asfáltico está determinado por la temperatura máxima y mínima del pavimento, la cual se determinó por la temperatura máxima y mínima del aire y la latitud.
5. La temperatura obtenida del pavimento, que se determinó con base en la temperatura del aire, se encuentra a 20 mm de profundidad de la superficie de la carpeta asfáltica.

6. Debido a que en Guatemala ninguna estación reportó temperaturas por debajo de los 5 °C, no es posible recomendar un PG para temperaturas mínimas, aunque, de acuerdo a la clasificación por grado de desempeño de las muestras de Perenco, son funcionales a temperaturas hasta -22 °C.

RECOMENDACIONES

1. Utilizar la mayor cantidad de estaciones meteorológicas que sea posible y tratar que su ubicación cubra el país completo, para abarcar la mayor parte del territorio nacional; de esta forma se podrá realizar una mejor propuesta de zonificación.
2. Considerar la obtención de muestras de cemento asfáltico que no sea elaborado en un laboratorio, sino que una muestra de producción para que los resultados de la caracterización sean más certeros.
3. Emplear, para investigaciones futuras, la implementación del tránsito vehicular y sus cargas, para obtener mayor exactitud en los resultados recomendados.
4. En lo que a confiabilidad corresponde, es mejor si se utiliza el mayor porcentaje posible, así el resultado que se obtendrá será más cercano a la realidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. BONILLA MIRANDA, Elías. *Determinación del tipo de cemento asfáltico según el grado de desempeño, de acuerdo con la zonificación climática y las cargas de tránsito del país*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de Costa Rica Lucem Aspicio, Facultad de Ingeniería Civil. 2014. 67 p.
2. Dirección General de Caminos, Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes*. Guatemala: DGC MCIV, 2000. 89 p.
3. GARBER, Nicholas J. *Ingeniería de tránsito y carreteras*. México: Thompson, 2008. 78 p.
4. Instituto del Asfalto. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. Estados Unidos: Instituto del Asfalto, 1982. 78 p.
5. _____. *Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de Superpave*. Estados Unidos: Instituto del Asfalto, 2009. 90 p.
6. _____. *Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de Superpave*. Estados Unidos: Instituto del Asfalto, 2014. 90 p.

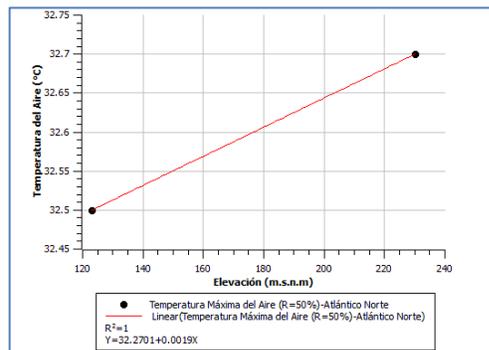
7. MONTEJO FONSECA, Alfonso. *Ingeniería de Pavimentos. Evaluación estructural, obras de mejoramiento y nuevas tecnologías*. 3a ed. México: Thompson, 2013. 20 p.

8. PFEIFFER, JPh. *The properties of asphaltic bitumen*. Londres: Board, 1950. 45 p.

APÉNDICES

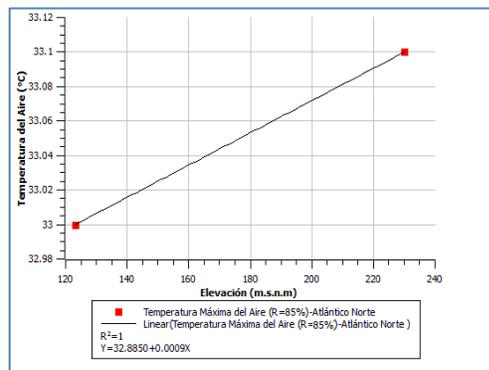
Gráficas de los resultados de la temperatura del aire y del pavimento, representada con la variable de elevación a diferentes niveles de confiabilidad.

1. Temperatura máxima del aire (R = 50 %) – Atlántico norte



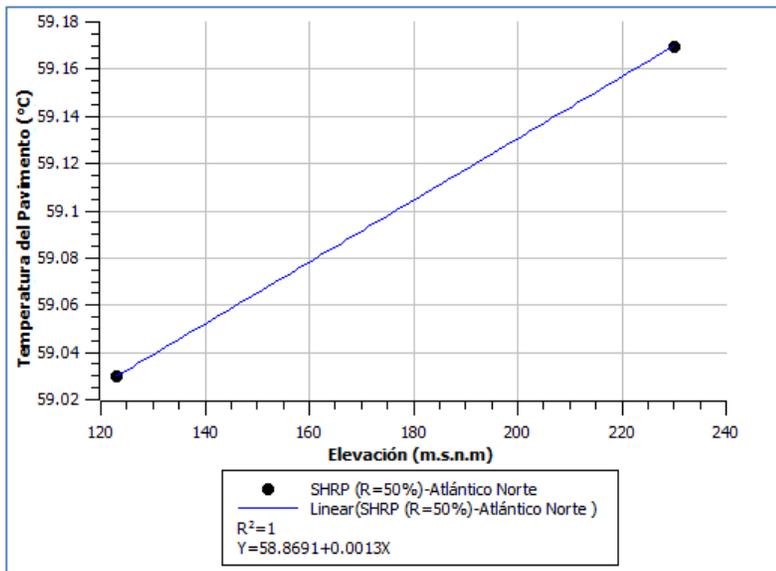
Fuente: elaboración propia.

2. Temperatura máxima del aire (R = 85 %) – Atlántico norte



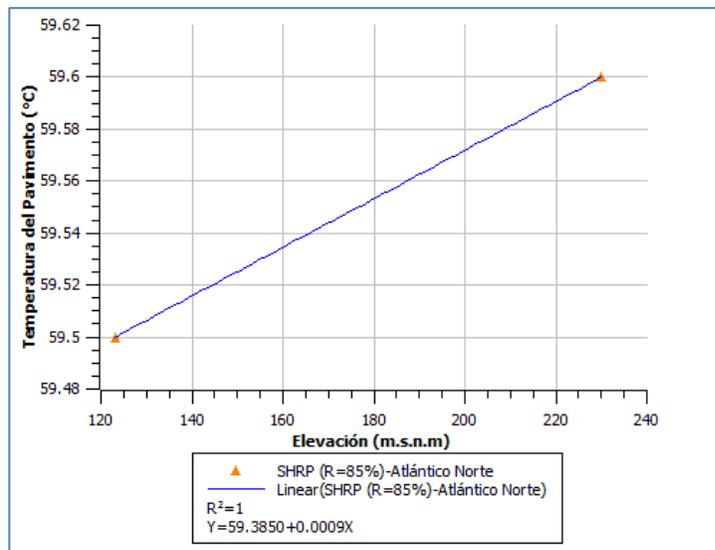
Fuente: elaboración propia.

3. SHRP (R = 50 %) Atlántico norte



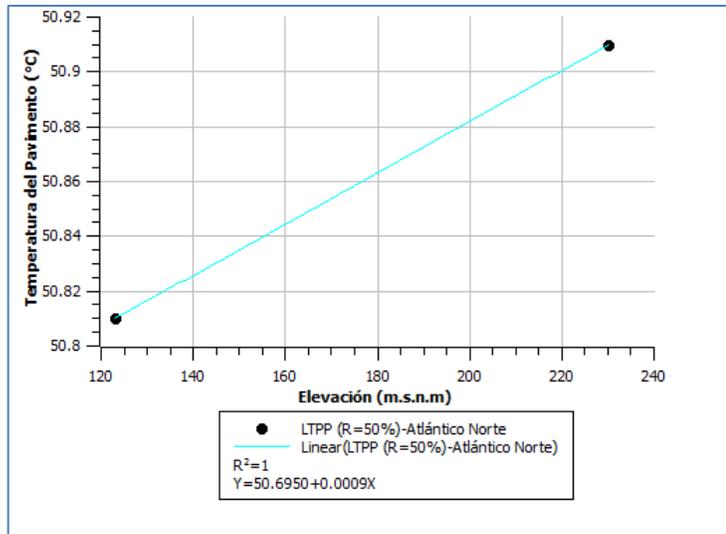
Fuente: elaboración propia.

4. Temperatura máxima del aire (R = 50 %) – Atlántico norte



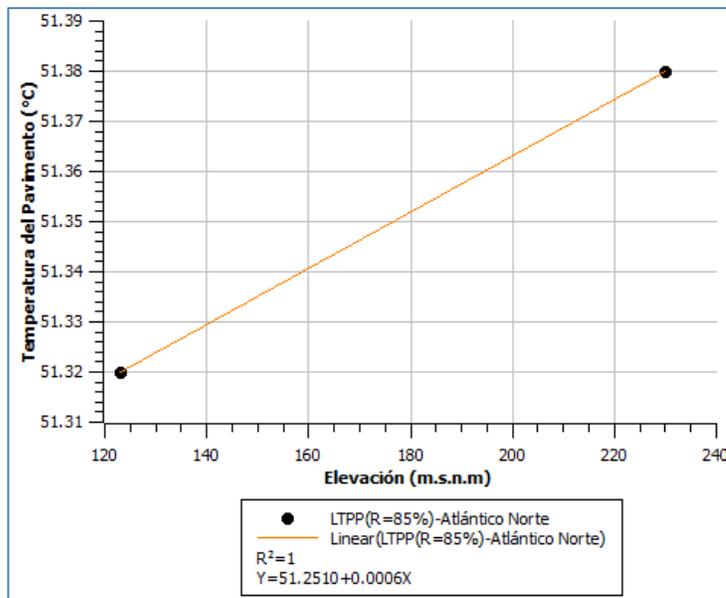
Fuente: elaboración propia.

5. LTPP (R = 50 %) – Atlántico norte



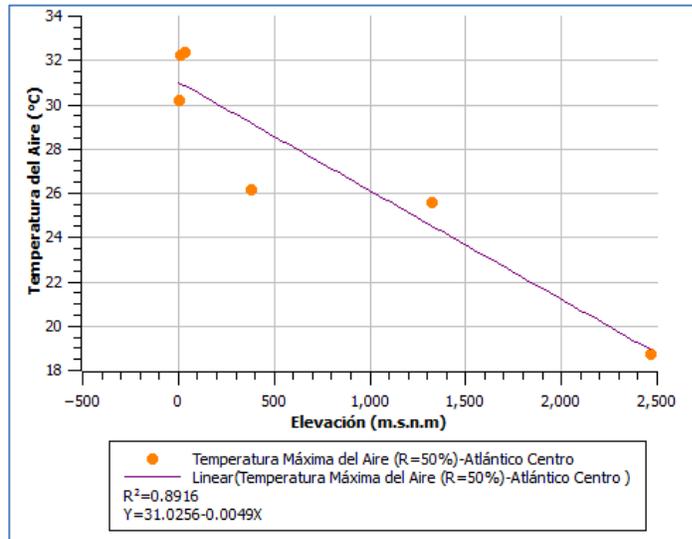
Fuente: elaboración propia.

6. LTPP (R = 85 %) – Atlántico norte



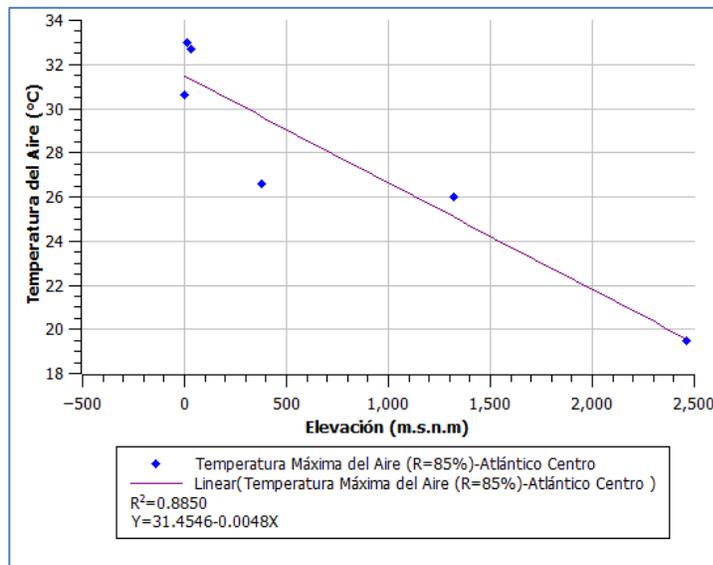
Fuente: elaboración propia.

7. Temperatura máxima del aire (R = 50 %) – Atlántico norte



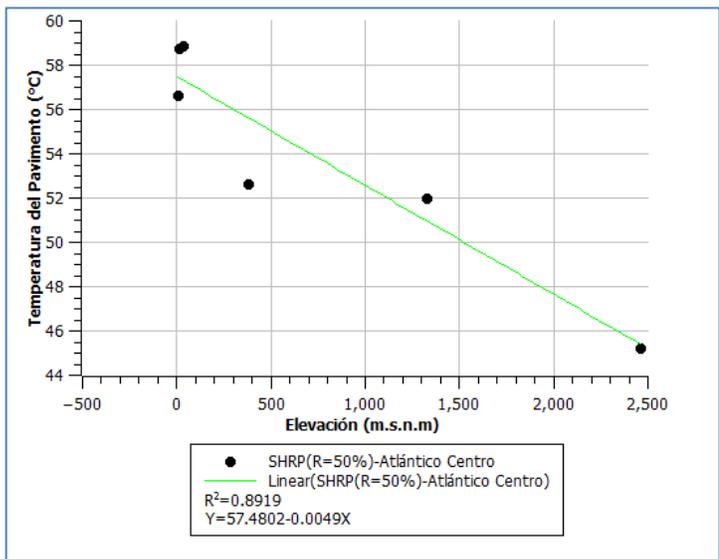
Fuente: elaboración propia.

8. Temperatura máxima del aire (R = 85 %) – Atlántico centro



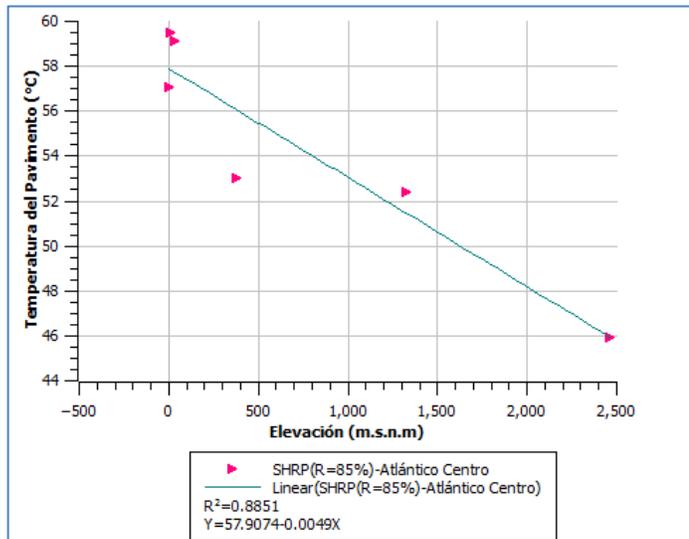
Fuente: elaboración propia.

9. SHRP (R = 50 %) – Atlántico centro



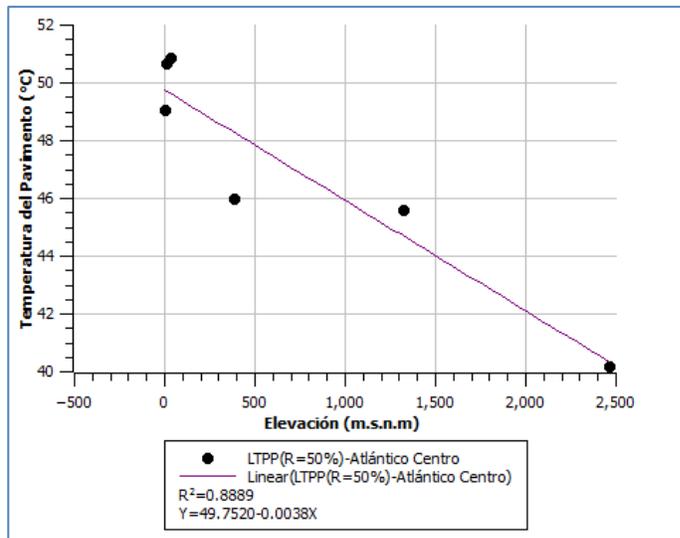
Fuente: elaboración propia.

10. SHRP (R = 85 %) – Atlántico centro



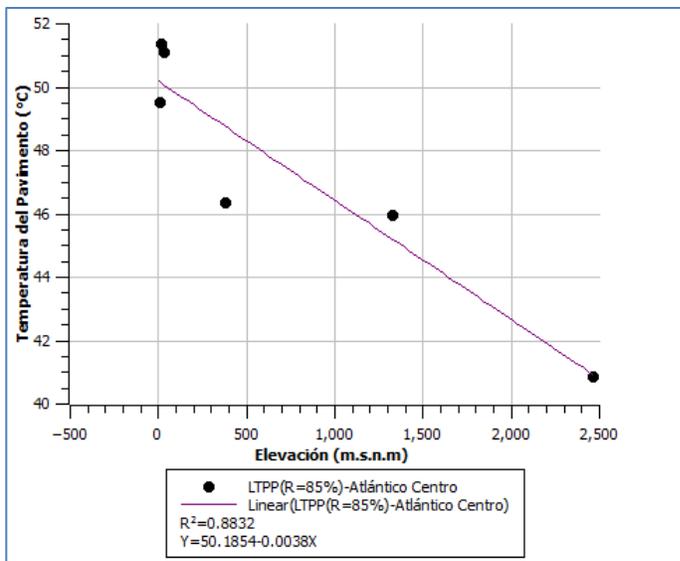
Fuente: elaboración propia.

11. LTPP (R = 50 %) – Atlántico centro



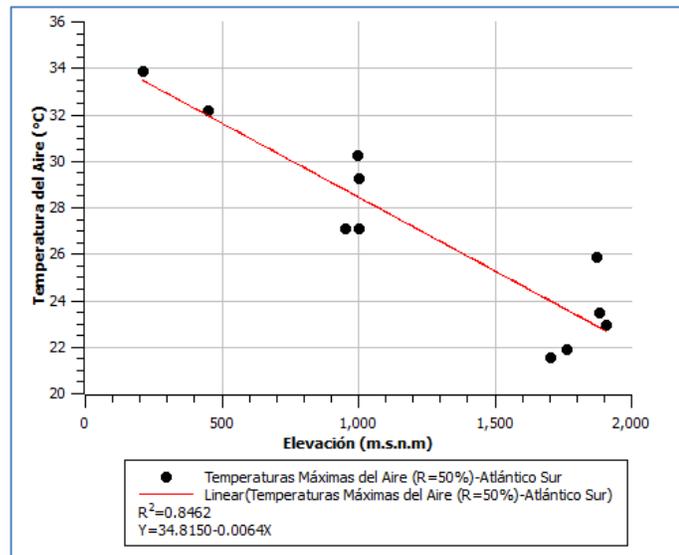
Fuente: elaboración propia.

12. LTPP (R = 50 %) – Atlántico centro



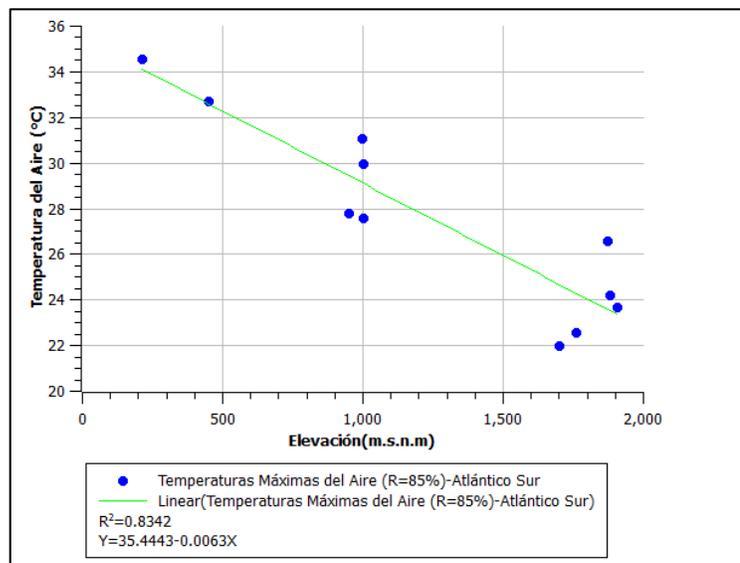
Fuente: elaboración propia.

13. Temperatura máxima del aire (R = 50 %) – Atlántico sur



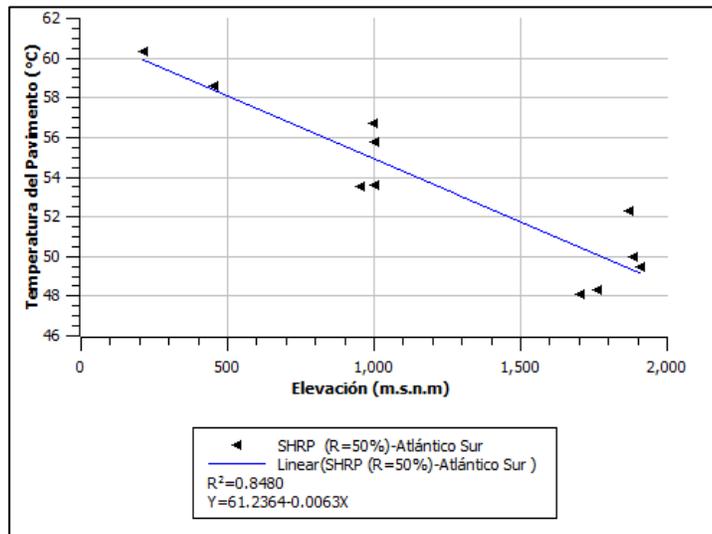
Fuente: elaboración propia.

14. Temperatura máxima del aire (R = 85 %) – Atlántico sur



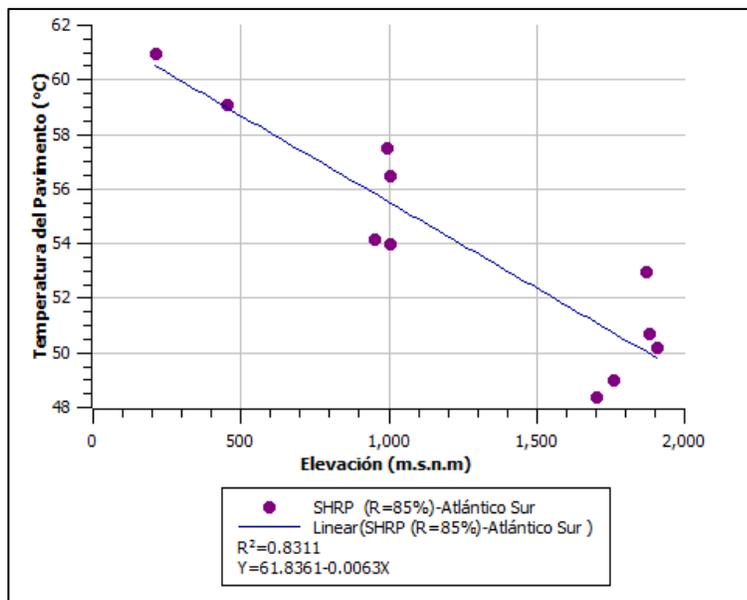
Fuente: elaboración propia.

15. SHRP (R = 50 %) – Atlántico sur



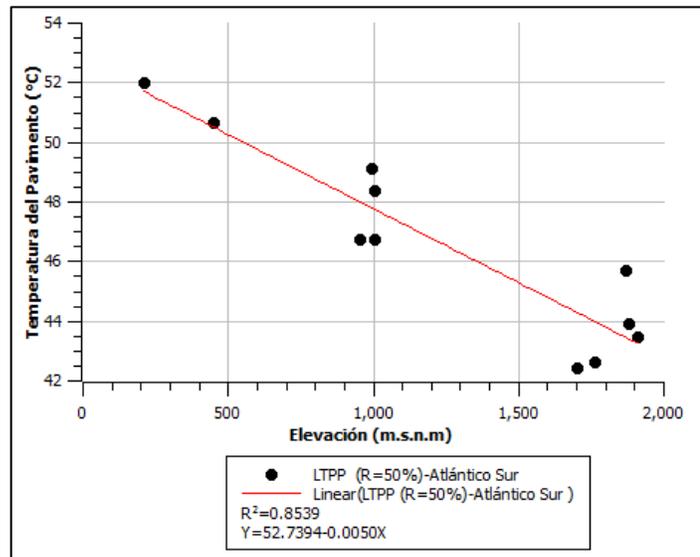
Fuente: elaboración propia.

16. SHRP (R = 85 %) – Atlántico sur



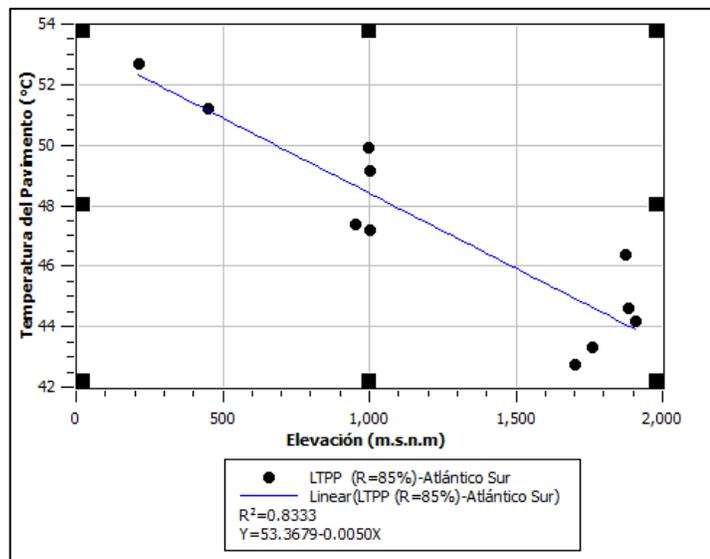
Fuente: elaboración propia.

17. LTPP (R = 50 %) – Atlántico sur



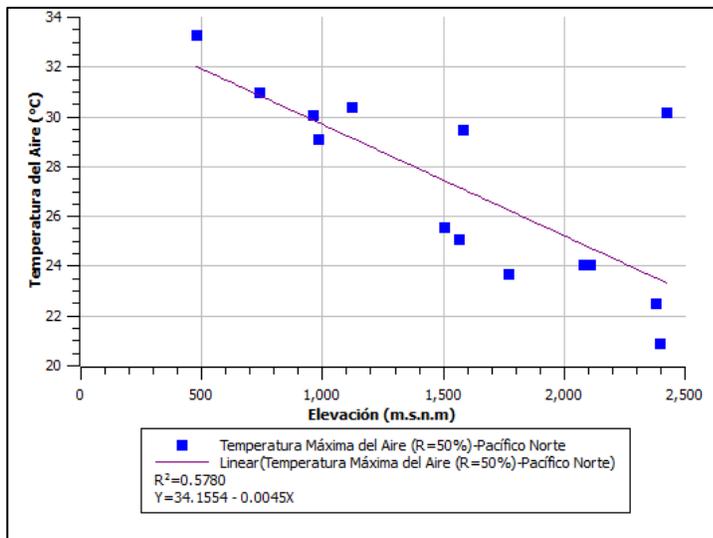
Fuente: elaboración propia.

18. LTPP (R = 50 %) – Atlántico sur



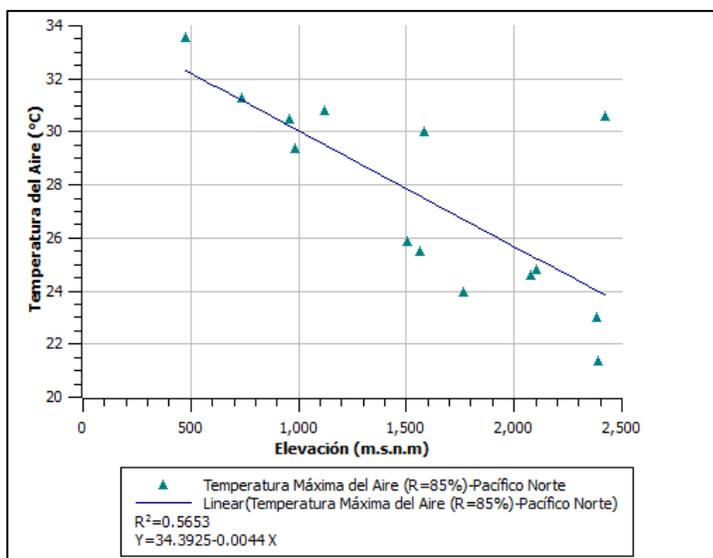
Fuente: elaboración propia.

19. Temperatura máxima del aire (R = 50 %) – Pacífico norte



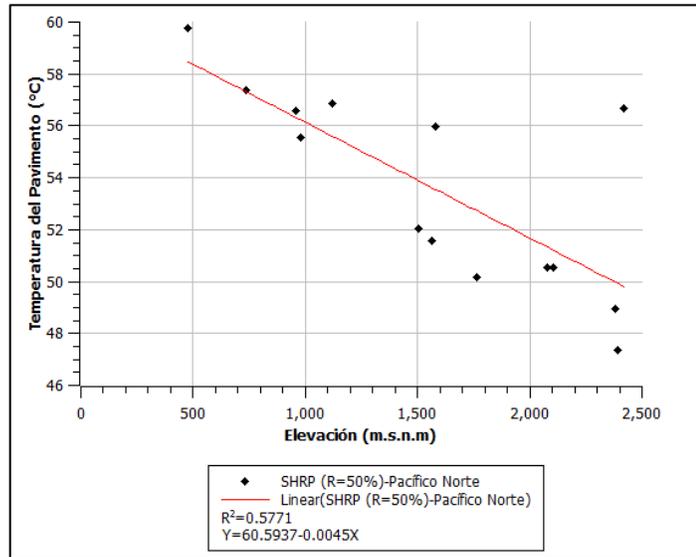
Fuente: elaboración propia.

20. Temperatura máximas del aire (R = 85 %) – Atlántico norte



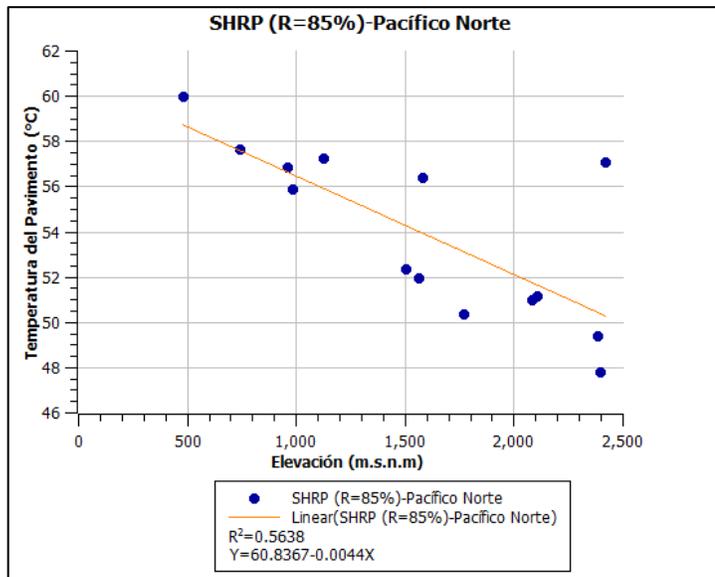
Fuente: elaboración propia.

21. SHRP (R = 50 %) – Pacífico norte



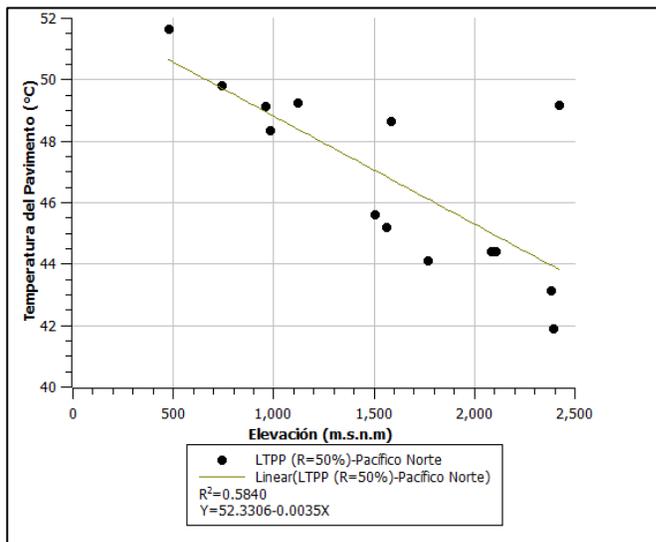
Fuente: elaboración propia.

22. SHRP (R = 85 %) – Pacífico norte



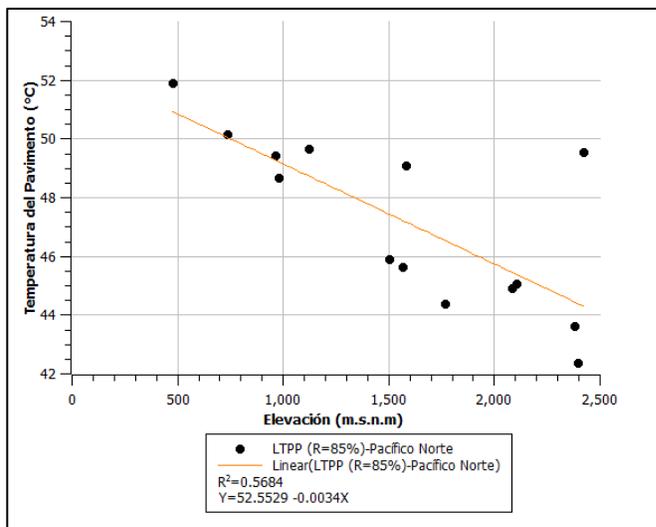
Fuente: elaboración propia.

23 SHRP (R = 85 %) – Pacífico norte



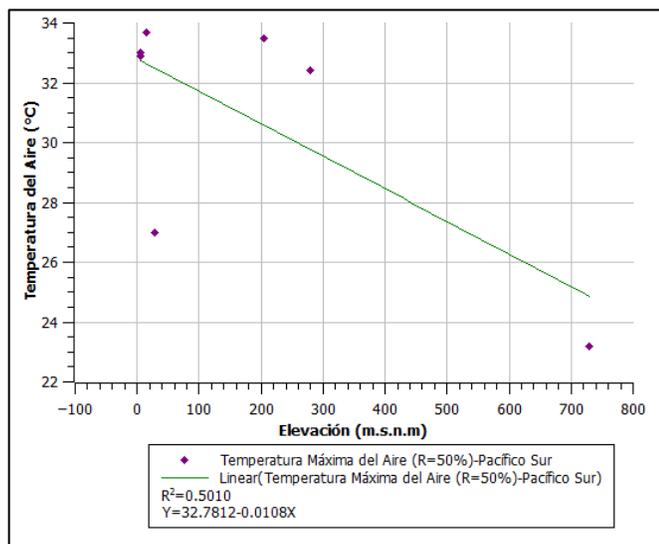
Fuente: elaboración propia.

24 SHRP (R = 85 %) – Pacífico norte



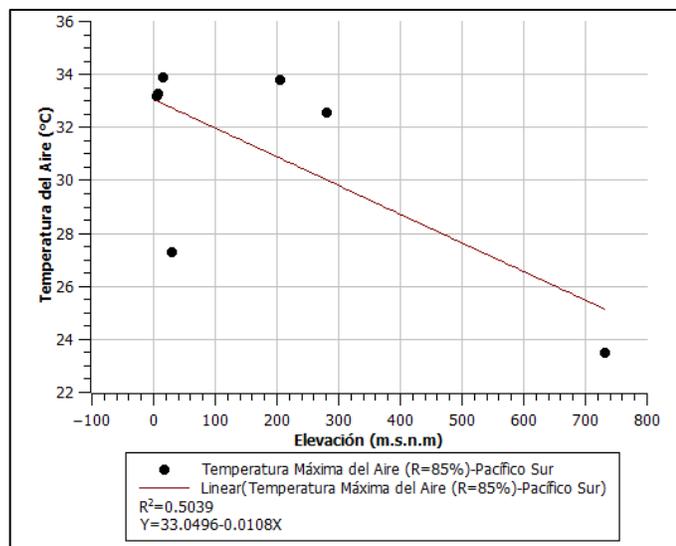
Fuente: elaboración propia.

25. Temperatura máxima del Aire (R = 50 %) – Pacífico sur



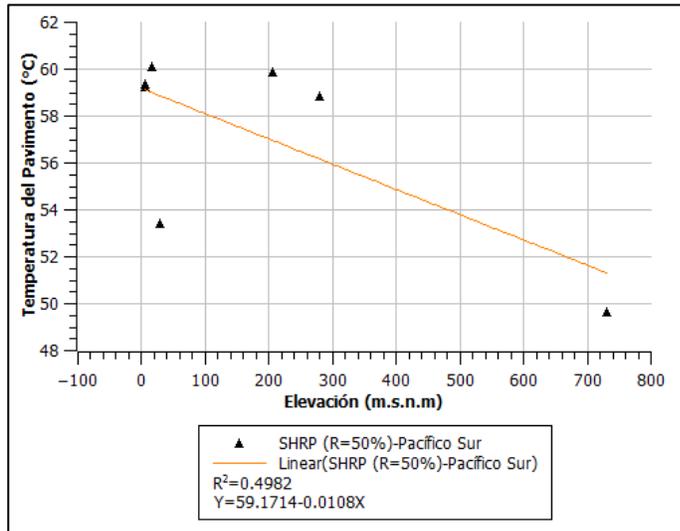
Fuente: elaboración propia.

26. Temperatura máxima del aire (R = 85 %) – Pacífico norte



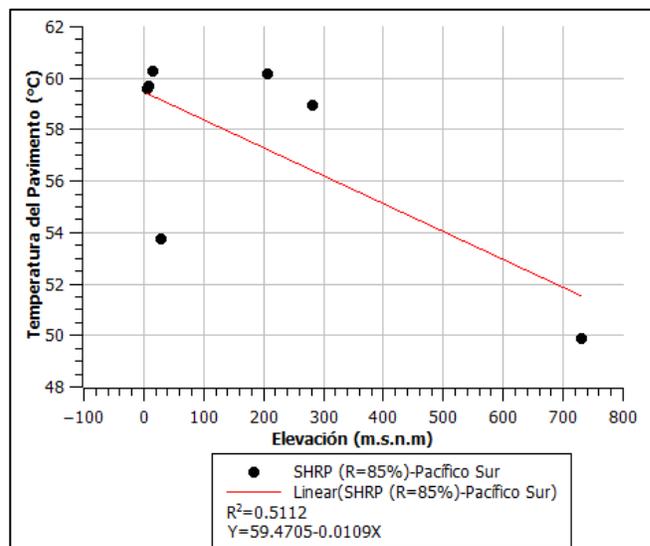
Fuente: elaboración propia.

27. SHRP (R = 85 %) – Pacífico sur



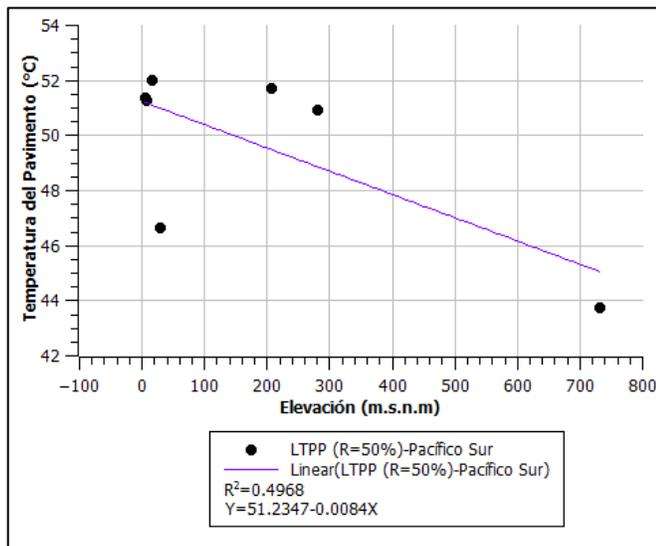
Fuente: elaboración propia.

28. Temperatura Máxima del Aire (R = 85 %) – Pacífico sur



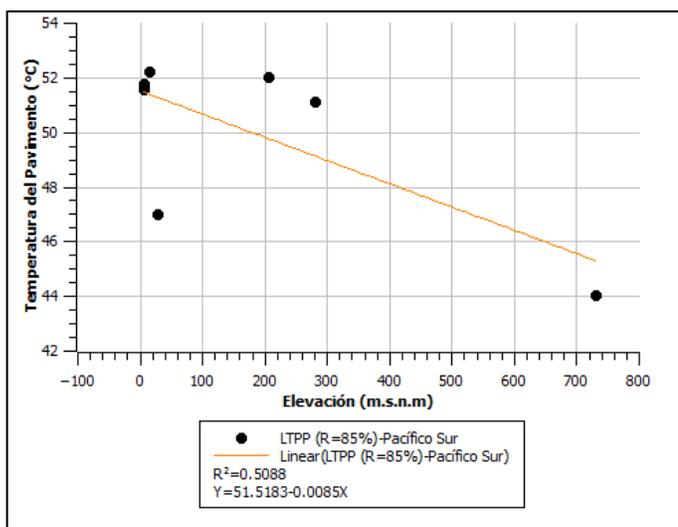
Fuente: elaboración propia.

29. SHRP (R = 85 %) – Pacífico sur



Fuente: elaboración propia.

30. SHRP (R = 85 %) – Pacífico sur



Fuente: elaboración propia.

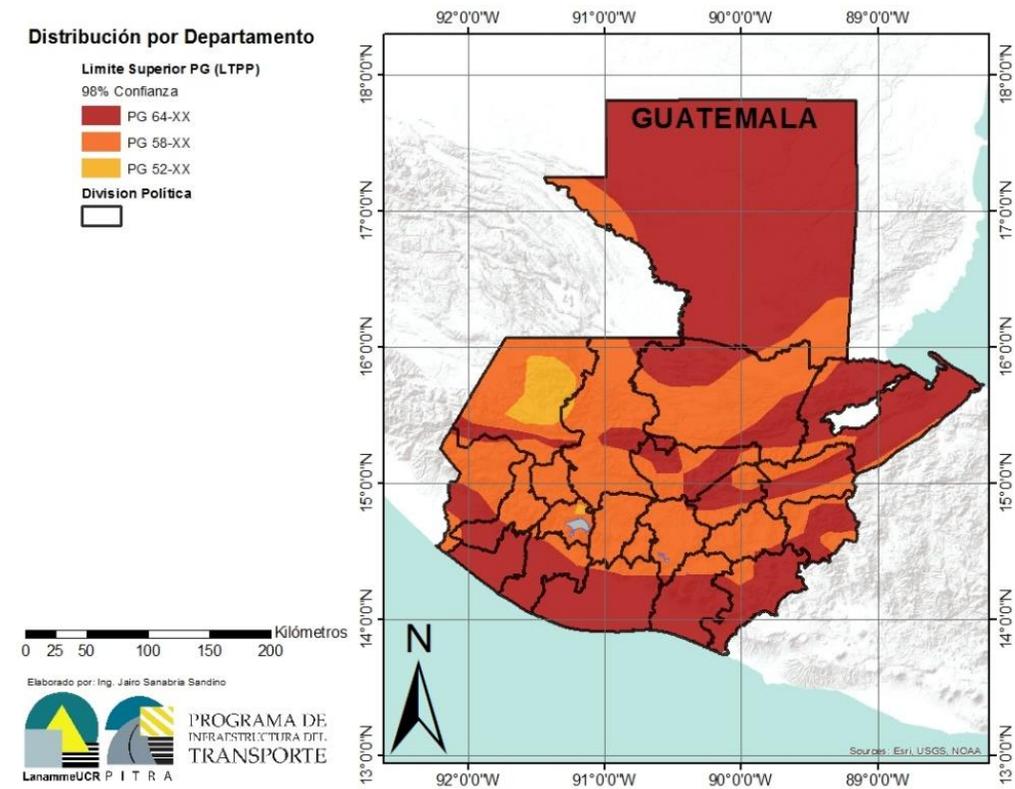
ANEXOS

1. PG recomendado a un nivel de confiabilidad de 98 %

Departamento	Área (km²)	PG 52-XX	PG 58-XX	PG 64-XX	PG Recomendado
ALTA VERAPAZ	10614,23	0,0%	62,2%	37,8%	PG 64-22(25)
BAJA VERAPAZ	3021,50	0,0%	44,6%	55,4%	PG 64-22(25)
CHIMALTENANGO	1864,93	0,0%	100,0%	0,0%	PG 58-22(22)
CHIQUIMULA	2408,42	0,0%	42,7%	57,3%	PG 64-22(25)
EL PROGRESO	1838,28	0,0%	49,7%	50,3%	PG 64-22(25)
ESCUINTLA	4507,34	0,0%	12,6%	87,4%	PG 64-22(25)
GUATEMALA	2207,77	0,0%	95,1%	4,9%	PG 58-22(22)
HUEHUETENANGO	7360,78	27,9%	61,6%	10,4%	PG 58-22(22)
IZABAL	7518,94	0,0%	12,4%	87,6%	PG 64-22(25)
JALAPA	2034,20	0,0%	94,0%	6,0%	PG 58-22(22)
JUTIAPA	3320,02	0,0%	10,5%	89,5%	PG 64-22(25)
PETEN	35999,76	0,0%	9,2%	90,8%	PG 64-22(25)
QUETZALTENANGO	2132,48	0,0%	65,6%	34,4%	PG 64-22(25)
QUICHE	7283,07	1,5%	82,9%	15,6%	PG 58-22(22)
RETALHULEHU	1700,15	0,0%	1,8%	98,2%	PG 64-22(25)
SACATEPEQUEZ	536,55	0,0%	100,0%	0,0%	PG 58-22(22)
SAN MARCOS	3551,10	0,0%	71,5%	28,5%	PG 64-22(25)
SANTA ROSA	3164,56	0,0%	20,4%	79,6%	PG 64-22(25)
SOLOLA	1167,13	4,7%	95,2%	0,1%	PG 58-22(22)
SUCHITEPEQUEZ	2393,52	0,0%	22,7%	77,3%	PG 64-22(25)
TOTONICAPAN	1076,37	0,0%	100,0%	0,0%	PG 58-22(22)
ZACAPA	2707,45	0,0%	53,1%	46,9%	PG 64-22(25)

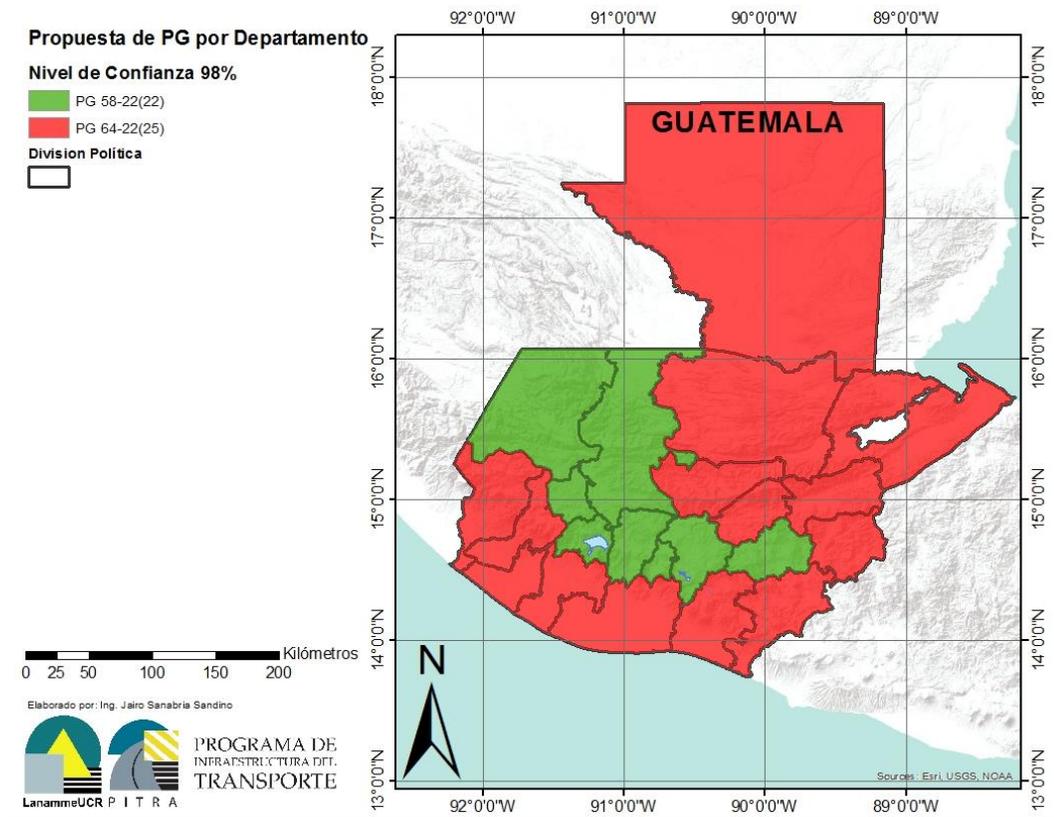
Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, elaborado por el Ing. Jairo Sanabria Sandino.

2. Distribución por departamento de PG a 98 % de confiabilidad



Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, elaborado por el Ing. Jairo Sanabria Sandino.

3. Propuesta de PG por departamento a un 98 % de confiabilidad



Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, elaborado por el Ing. Jairo Sanabria Sandino.

