



ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

<http://dx.doi.org/10.14482/inde.38.2.620.19>

Determinación y zonificación del grado de desempeño de los asfaltos para Cuba según la metodología Superpave

*Determination and Zoning of Asphalts
Performance Grade for Cuba According
to the Superpave Methodology*

ANADELYS ALONSO AENLLE*

JESSIKA MORALES FOURNIER**

CAROLINA GARRIDO ACOSTA***

DANIA OLGA ABREU HERNÁNDEZ****

TOMÁS ENRIQUE MARTÍNEZ ROJO*****

* Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cuba.

Orcid: 0000-0003-2625-2129.

Correspondencia: anadelys@civil.cujae.edu.cu

** Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cuba.

Orcid: 0000-0002-8111-0046

*** Ministerio de Educación Superior, Cuba.

Orcid: 0000-0003-2639-2762

**** Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cuba.

Orcid: 0000-0003-1282-5387

***** Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cuba.

Orcid: 0000-0001-7575-8578



Resumen

Los métodos tradicionales de clasificación de los asfaltos se basan en la penetración o viscosidad de estos, pero tienen como desventaja que se pueden clasificar diferentes tipos de asfaltos con el mismo grado, cuando en realidad tienen comportamientos diferentes. Además, no predicen el funcionamiento del pavimento ante las variaciones de carga y temperatura. Para solucionar estas limitaciones, surge el método de diseño Superpave, que, entre sus novedades, propone nuevas especificaciones para la clasificación de los asfaltos, en función de su grado de desempeño (PG, por sus siglas en inglés). El sistema PG se basa en la idea de que las propiedades de los asfaltos deben estar relacionadas con las condiciones bajo las cuales se está utilizando. Esto involucra condiciones climáticas esperadas, temperaturas del pavimento y condiciones de envejecimiento. El objetivo de este trabajo fue determinar los PG de los asfaltos en Cuba. Para esto, se emplean tres modelos de cálculo y las condiciones climáticas y geográficas de 52 estaciones meteorológicas. Se compararon los resultados obtenidos por los modelos empleados y se escogió el que mejor homogeneidad mostraba en los resultados. De esta forma, se determinaron las temperaturas extremas a las cuales será sometido el pavimento asfáltico. Como novedad para Cuba, permitió establecer un sistema único de clasificación para todos los asfaltos utilizados en el país y dos clasificaciones: PG 64-6 y PG 64-0. Con estos resultados, se diseñó un mapa de zonificación de los PG en el país.

Palabras clave: asfaltos, comportamiento, penetración, temperaturas, zonificación.

Abstract

Traditional asphalt classification methods are based on their penetration or their viscosity. They have limitations as they can classify different types of asphalt with the same degree, when in fact they have different behaviors. Also, the performance of pavement in the face of variations in load and temperature is not predicted. To solve these limitations, the Superpave design method was created. Among its novelties, it proposes new specifications for the classification of asphalt, depending on their performance grade (PG). PG system is based on the idea that the properties of an asphalt binder should be related to the conditions under which it is being used. This involves expected climatic conditions, pavement temperature, as well as ageing conditions. The aim of this work is to determine the PG grade that asphalt in Cuba must have. For this, three calculation models and the climatic and geographic conditions of 52 meteorological stations were used. The results obtained by the models used were compared and the one with the best homogeneity in the results was selected. With these results a zoning map of PG grades in Cuba were designed.

Keywords: asphalt, behavior, penetration, temperatures, zoning.

1. INTRODUCCIÓN

Entre los criterios para la clasificación del asfalto, se encuentra el sistema de clasificación por penetración [1], el cual determina la consistencia del asfalto a 25 °C. Es un método que tiene como desventajas que es una prueba empírica, no mide las propiedades viscoelásticas del asfalto y no refleja su desempeño, ya que la temperatura de ensayo es diferente de la de servicio [2]-[3]. Posteriormente, surge la clasificación por viscosidad, mediante la cual es posible clasificar cementos asfálticos en estado virgen y en residuos asfálticos [4]. Este sistema fue concebido dadas las limitantes que presenta el sistema de clasificación por penetración. La viscosidad absoluta mide la resistencia del asfalto a fluir a una temperatura de 60 °C [5]-[6]. Tiene como desventaja que no es aplicable a fluidos newtonianos, se realiza a temperaturas diferentes de las de servicio del pavimento y solo es capaz de brindar información del comportamiento viscoso del material [5]. Los ensayos de penetración y viscosidad pueden clasificar diferentes asfaltos con el mismo grado, cuando, en realidad, su desempeño frente a diferentes temperaturas puede ser completamente distinto. Ambos tipos de ensayos caracterizan los ligantes a temperaturas medianas y altas, por lo que no se analiza con estos las propiedades a bajas temperaturas [7].

Basándose en las dificultades que presentaban los métodos de clasificación por penetración y viscosidad, se crea la metodología de diseño de mezclas asfálticas y sistema de análisis Superpave (por sus siglas en inglés). Este introduce nuevas especificaciones y ensayos encaminados a controlar tres problemas específicos que presentan los pavimentos: deformación permanente, agrietamiento por fatiga y agrietamiento a bajas temperaturas [8], a la vez que incorpora la caracterización de los materiales asfálticos basados en su desempeño según las condiciones ambientales de diseño y no solo con sus propiedades físicas o químicas.

La metodología Superpave provee ensayos capaces de relacionar las propiedades físicas experimentadas en terreno con experiencias realizadas en laboratorio [7]. Incluye una nueva nomenclatura para clasificar el grado de los asfaltos, el cual se designa como PG XX - YY [7], donde PG: *performance grade* o grado de desempeño; XX: temperatura máxima promedio del pavimento (°C); YY: temperatura mínima superficial del pavimento (°C).

Las designaciones de estos grados están referidas a las temperaturas máximas del pavimento en un periodo móvil de siete días y la temperatura mínima de diseño [1], [8]-[11]. Estos valores XX e YY son determinados según registros históricos de temperaturas del sector donde se emplaza el proyecto [9]. No solo se establecen los valores máximos y mínimos de temperaturas que resisten las deformaciones o los agrietamientos por temperatura respectivamente, sino que también se analizan las temperaturas medias relacionadas con la resistencia a la fatiga a través de la siguiente ecuación [9]:

$$T_{int} = \frac{XX - YY}{2} + 4 \quad (1)$$

Para la determinación de los valores de temperatura, se han desarrollado diferentes modelos matemáticos para diferentes regiones y países [2], [9]. En este trabajo, se abordarán los desarrollados por el SRHP (por sus siglas en inglés) [3] y el LTPP (por sus siglas en inglés) [10], que son los modelos iniciales y que se han tomado de referencia por otros investigadores. Para cada modelo, se emplean el 50 y el 98 % de confiabilidad. En relación con el análisis costo-beneficio, se puede asumir una mayor confiabilidad [2], aunque por razones económicas es posible en países en desarrollo seleccionar un grado de desempeño con el 50 % [11], [12].

En Cuba, aunque el procedimiento para el diseño de mezclas asfálticas que se emplea es el tradicional método Marshall, se reconoce el nivel de análisis que introduce el Superpave y lo que representa considerar variables como el clima, que incide considerablemente en el comportamiento y estado de los pavimentos del país. Máxime cuando los principales deterioros que se observan en las vías están relacionados con deformaciones provocadas por las altas temperaturas. Por esto, se han realizado investigaciones que han analizado y valorado la adaptación e introducción de las especificaciones del método Superpave para el diseño de las mezclas asfálticas, tanto las relativas a la granulometría de las mezclas [13] como a la clasificación de los asfaltos [14]-[15]. También se ha estudiado la temperatura de cálculo de los pavimentos en atención a la influencia del cambio climático a partir de consideraciones realizadas en el Superpave [16].

Este trabajo tiene como fin introducir nuevos criterios de clasificación y evaluación de los asfaltos para mejorar la calidad y durabilidad de los pavimentos asfálticos en Cuba, mediante la determinación de las temperaturas a las cuales estará sometido el pavimento de acuerdo con su ubicación geográfica. Además, según las especificaciones establecidas por la metodología de diseño Superpave, proponer un sistema de clasificación para todos los asfaltos utilizados en Cuba. Así es como el objetivo de esta investigación es obtener un mapa de zonificación térmica de los asfaltos para el territorio de Cuba, en consideración a su situación climática, según el grado de desempeño (PG, por sus siglas en inglés) establecido por el método.

2. METODOLOGÍA

2.1. Cálculo de las temperaturas máximas y mínimas del pavimento

Para la definición del grado de desempeño del asfalto (PG), se identifica la temperatura promedio del periodo de siete días en que se presentan las temperaturas más altas, que representa la temperatura máxima. Del mismo modo, para calcular el valor de

la temperatura mínima, se elige el valor más bajo, la cual representa la temperatura mínima de ese año. Se calcula la media y desviación estándar de todas las máximas y mínimas temperaturas calculadas. Se debe contar con datos de temperaturas como mínimo de veinte años de estaciones meteorológicas en todo el país. Las temperaturas máximas y mínimas obtenidas de las estaciones meteorológicas corresponde a la temperatura del aire. Para obtener las temperaturas del pavimento a una profundidad de 20 mm, se emplearán los modelos que se exponen a continuación (SRHP₁, SRHP₂, LTPP), empleándose el 50 y el 98 % como niveles de confianza.

2.1.1. Modelo 1 desarrollado por SRHP (SRHP₁)

A través de mediciones en campo, se obtuvo un modelo para determinar la temperatura de la superficie del pavimento y, posteriormente, un modelo para determinar la temperatura en función de la profundidad. Se consideran condiciones evaluadas en modelos teóricos. Se asume un coeficiente de absorción solar de 0,9, transmisión de radiación en el aire de 0,81, radiación atmosférica de 0,7 y velocidad del viento de 45 m/s. De este modo, la ecuación desarrollada por el SHRP para la temperatura máxima de diseño es [3]:

$$T_{20\text{mm}} = (T_{\text{aire}} - 0,00618 \text{ Lat}^2 + 0,22890 \text{ Lat} + 42,2)(0,9545) - 17,78 + Z\sigma \quad (2)$$

Donde:

$T_{20\text{mm}}$: Temperatura máxima de diseño a una profundidad de 20 mm

T_{aire} : Temperatura máxima promedio en el periodo de siete días (°C)

Lat: Latitud geográfica de la ubicación del proyecto en grados

En el caso de la temperatura mínima de diseño, se considera igual a la temperatura mínima media del aire que corresponde con la temperatura de la superficie [3]. No obstante, se expresa la siguiente ecuación para obtener la temperatura mínima de diseño en función de la profundidad [10]:

$$T_{\text{pav}} = T_{\text{aire}} + 0,051H - 0,000063H^2 - Z\sigma \quad (3)$$

Donde:

T_{pav} : Temperatura mínima del pavimento bajo la superficie (°C)

T_{aire} : Temperatura mínima del aire ($^{\circ}\text{C}$)

H: Profundidad desde la superficie (mm)

Z: Coeficiente de la tabla de distribución normal, $Z = 0$ para un 50 % de confianza, $Z = 2,055$ para un 98 % de confianza

Desviación estándar de la temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$)

Las variables σ y Z representan la desviación estándar de las temperaturas y el coeficiente de distribución normal, ambas relacionadas con la confiabilidad en los cálculos. Cuando se va a emplear el 50 % de confiabilidad en las temperaturas máximas y mínimas, estos parámetros no intervienen. Sin embargo, si se emplea el 98 %, el método Superpave recomienda para determinar la temperatura mínima (YY) restarle dos veces la desviación estándar ($Z \approx 2$) y añadirla dos veces cuando se va a determinar la temperatura máxima (XX) [9].

2.1.2. Modelo 2 desarrollado por SRHP (SHRP₂)

Bajo el mismo principio del modelo anterior, y manteniendo la formulación para determinar la temperatura máxima, posteriormente se desarrolló una nueva relación, básicamente para datos de Canadá. Así es como la temperatura mínima sería determinada, entonces, por la siguiente fórmula:

$$T_{\text{av}} = 0,859 T_{\text{aire}} + 1,7 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

2.1.3. Modelo 3 desarrollado por FHWA (LTPP)

Desarrollado por la FHWA (por sus siglas en inglés), a través de un software llamado LTPP (por sus siglas en inglés) Bind Superpave, que considera factores importantes mediante los cuales se puede realizar la elección de un asfalto, el área geográfica, la temperatura del pavimento y la de aire [10]. Esta investigación entregó como resultado, a través del programa SMP (por sus siglas en inglés), nuevas herramientas para la modelación de las temperaturas de diseño máxima y mínima [10], [17].

Así, la fórmula establecida para el cálculo de la temperatura máxima de diseño según LTPP es:

$$T_{\text{pav},h} = 54,32 + 0,78 T_{\text{aire}} - 0,0025 L a t^2 - 15,14 \text{Log}_{10} (H + 25) + z(9 + 0,61 \sigma_{\text{aire}}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Donde:

Lat: Latitud geográfica de la ubicación del proyecto en grados

Z: Coeficiente de la tabla de distribución normal, $Z = 0$ para un 50 % de confianza, $Z = 2,055$ para un 98 % de confianza

σ : Desviación estándar de la temperatura máxima (°C)

La ecuación siguiente muestra el modelo LTPP para la temperatura mínima del pavimento [18]:

$$T_{pav,l} = -1,56 + 0,72 T_{aire} - 0,004 Lat^2 + 6,26 \text{Log}_{10}(H + 25) - z(4,4 + 0,52 \sigma_{aire}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

2.2. Definición de los grados de desempeño de los asfaltos (PG)

Con los valores de temperaturas máximas y mínimas de diseño obtenidos para cada estación y modelo, se procede a elegir el grado de desempeño (PG) para cada una de ellas, siguiendo el criterio de que el límite superior debe ser mayor a la temperatura de diseño y el límite inferior menor.

2.3. Confección del mapa de zonificación de los grados de desempeño de los asfaltos en Cuba

Los grados de desempeño obtenidos se distribuyen en un mapa de Cuba en cada estación meteorológica, para comparar la forma en que se comportan estos en el país y analizar si existe un patrón que permita homogeneizar y agrupar los grados de desempeño. Para determinar este patrón, se establecen las siguientes consideraciones:

1. Homogeneidad de la distribución. Las estaciones cercanas deben presentar condiciones climáticas y grados PG similares.
2. Temperaturas mínimas aceptables. El modelo seleccionado debe ser capaz de predecir grados de temperaturas inferiores, para una zona donde se sepa que existen bajas temperaturas.
3. Mejor comportamiento del grado de las temperaturas máximas. Mostrar grados de desempeño que ofrezcan mayor confianza en que las temperaturas máximas estarán bajo lo diseñado.

Para la homogeneización y agrupación de los grados PG en el mapa, se empleará el mapa isotérmico y de relieve de Cuba, y el diagrama de Voronói; se establecerá la zona de acción del conjunto de estaciones similares; y se evaluará la posibilidad de aumentar su grado máximo o disminuir el mínimo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Características de Cuba como zona de estudio

Cuba se encuentra ubicada en el hemisferio norte entre América del Norte y América del Sur, aproximadamente entre los 19 y 23° de latitud norte, y entre los 74 y 85° de longitud oeste. Debido a su ubicación geográfica, se encuentra ubicada muy próxima al trópico de Cáncer en la zona intertropical. Por su latitud, recibe altos niveles de radiación solar, debido a que los rayos solares caen casi verticalmente todo el año, caracterizado por un clima cálido y carente de invierno. El clima de Cuba es cálido con rasgos de semicontinentalidad, estacionalmente húmedo y con influencia marítima.

3.2. Temperaturas máximas y mínimas de diseño para Cuba

Para determinar las temperaturas máximas y mínimas del pavimento, se cuenta con temperaturas ambientales diarias para un periodo de veinte años de 52 estaciones meteorológicas distribuidas en todo el país (figura 1).



FIGURA 1. DISTRIBUCIÓN DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS ESTUDIADAS.

Se procedió a determinar para cada estación la temperatura máxima y mínima del pavimento (figuras 2 y 3) y la desviación estándar. Posteriormente, con estas se determinaron las temperaturas del pavimento para cada modelo con un nivel de confianza del 50 y el 98 %.

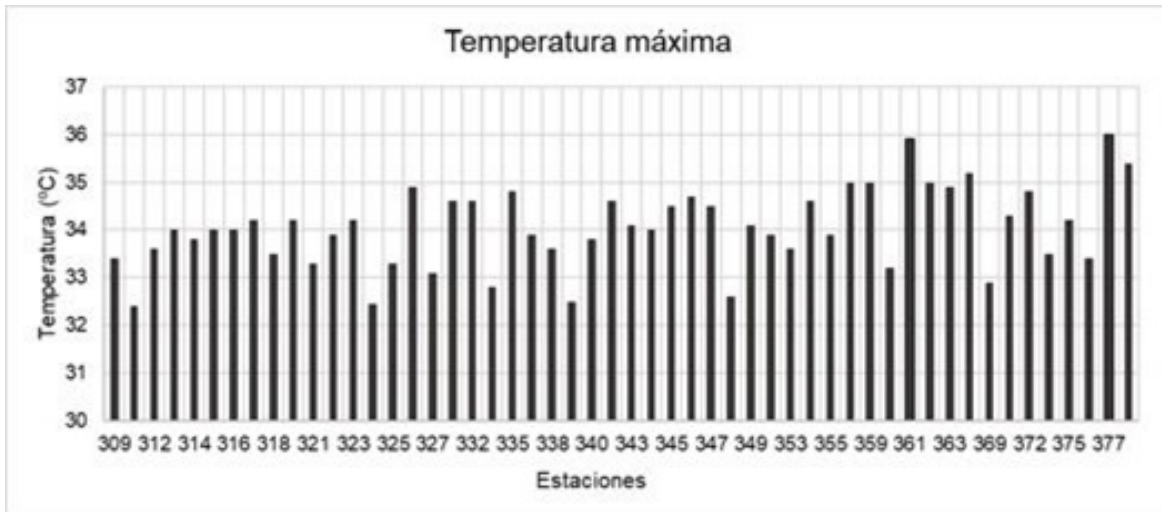


FIGURA 2. PROMEDIO DE LOS SIETE DÍAS DE MÁXIMA TEMPERATURA DEL AIRE.

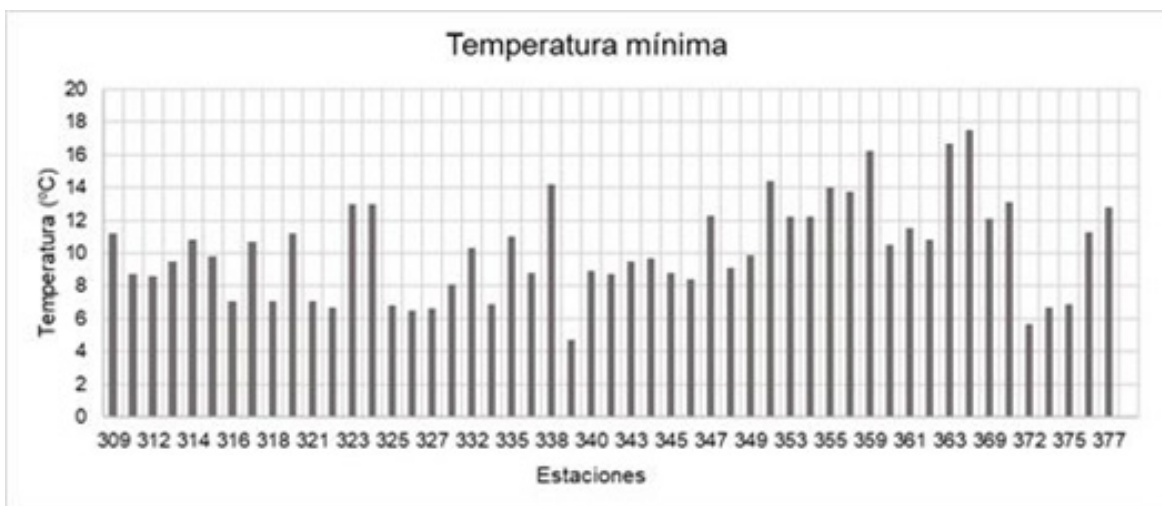


FIGURA 3. PROMEDIO DE TEMPERATURA MÍNIMA DEL AIRE.

En cuanto a las temperaturas máximas en Cuba (figura 2), se observa una variación entre 32 °C y 36 °C. En cambio, para las temperaturas mínimas (figura 3), la variación es mayor, que llega a ser entre 4 °C y 18 °C. Por tanto, se esperan mayores variaciones en los grados de desempeño del asfalto para los valores mínimos (YY) que para los máximos (XX).

3.3. Selección del grado de desempeño (PG) para cada estación

Se asignó un grado PG en cada estación meteorológica en función de las temperaturas máximas y mínimas de diseño para cada modelo empleado. Todos los modelos de cálculo analizados dieron como resultado grados de desempeño similares para todas las estaciones del país, registrándose como PG máximos 58 °C y 64 °C y como mínimos 0 °C, 6 °C, 10 °C, 12 °C y 18 °C.

Es necesario aclarar que, cuando se especifica en el caso de Cuba un PG 58-0, PG 58-6, PG 58-10 y PG 64-0, PG 64-6, PG 64-10 para las temperaturas mínimas, este valor es positivo.

3.4. Selección del modelo para confeccionar el mapa de zonificación

A partir de los PG obtenidos (tabla 3), los modelos SHRP₁ y SHRP₂ brindan resultados similares para el grado de temperatura máxima, ya que la fórmula empleada no varía; no así en el caso de la temperatura mínima. Sin embargo, no se muestran diferencias entre un modelo y otro. Solo en las estaciones 312 y 333 varía la temperatura mínima, otorgando el modelo SHRP₁ mayor seguridad, ya que los valores resultantes son menores.

Otro criterio a considerar para la definición del modelo que mejor se ajuste a las condiciones de Cuba es la comparación de los resultados de la distribución de temperaturas máximas y mínimas, y los PG obtenidos en cada uno de ellos, asociados a las características del país.

En las figuras 4 y 5, se relacionan las temperaturas máximas y mínimas del pavimento con las del aire. Se observa cómo se obtienen valores similares de temperaturas máximas para las dos confiabilidades estudiadas en los modelos SHRP_{1,2} (50 y 98 %) (figura 4) con una diferencia máxima entre ellas de 2 °C. Sin embargo, para el modelo LTPP, las diferencias entre las confiabilidades es de 6 °C y se obtienen los mínimos y máximos valores para el 50 y el 98 %, respectivamente, entre los cuatro modelos analizados.

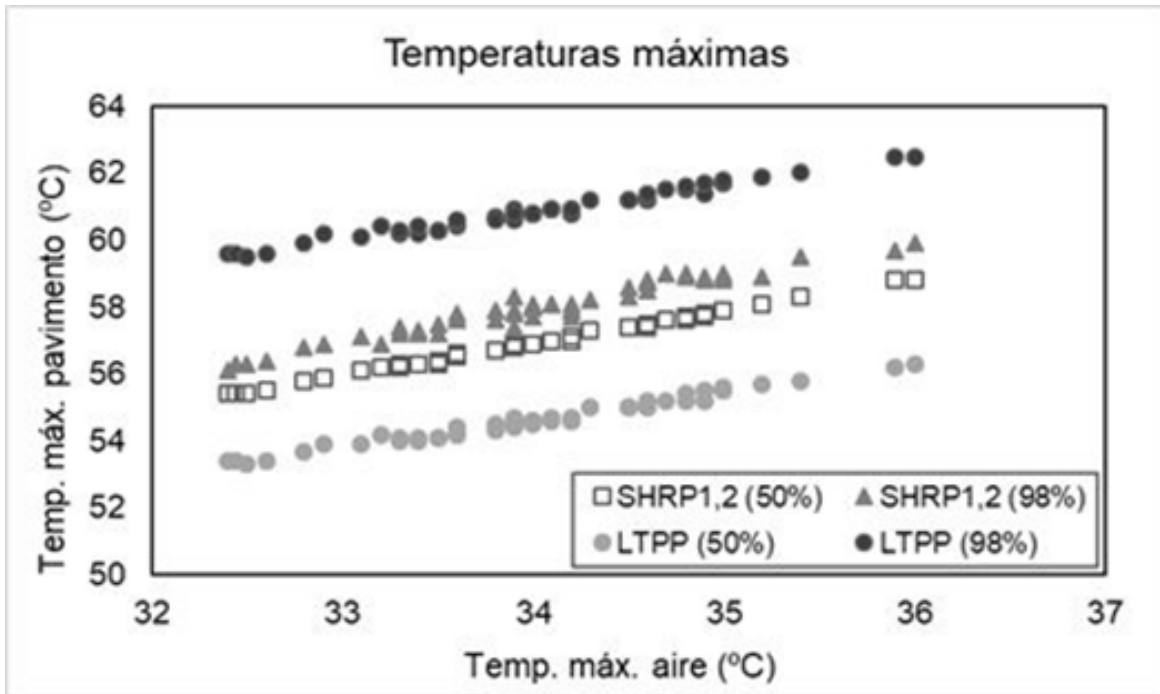


FIGURA 4. RELACIÓN DE TEMPERATURA MÁXIMA DEL AIRE CON LAS DEL PAVIMENTO.

En el caso de las temperaturas mínimas (figura 5), se obtienen similitudes entre los modelos SHRP respecto de las confiabilidades estudiadas, es decir, las temperaturas son similares para los modelos SHRP₁ y SHRP₂ para un 50 %, análogo a lo que sucede para un 98 %. En el caso del modelo LTPP, se comporta igual que para las temperaturas máximas; se obtienen las mayores diferencias entre las dos confiabilidades que llegan a ser de hasta 5 °C. Entonces se hace notable la diferencia entre las confiabilidades para los modelos desarrollados por el LTPP.

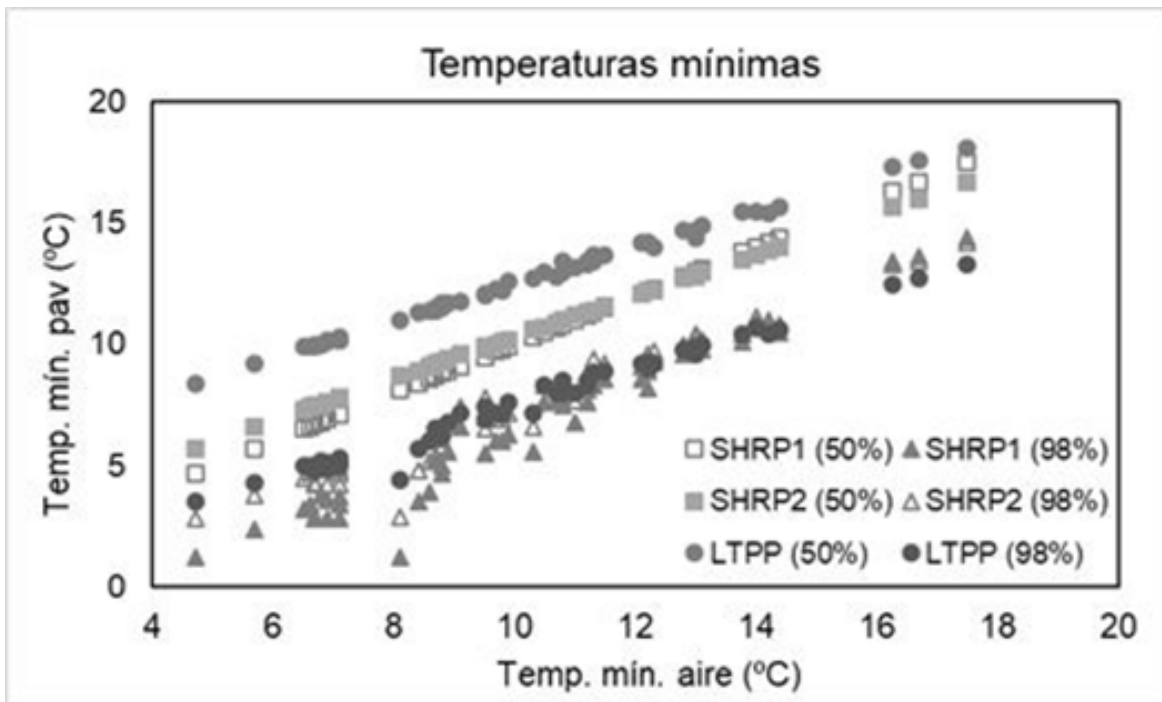


FIGURA 5. RELACIÓN DE TEMPERATURA MÍNIMA DEL AIRE CON LAS DEL PAVIMENTO.

En las figuras 6 y 7, se observa que los modelos empleados siguen similar comportamiento y las diferencias se encuentran en los valores de temperaturas máximas y mínimas que se obtienen. En el caso de las temperaturas máximas (figura 6), son más considerables las diferencias entre los modelos y las confiabilidades, que llegan a ser de aproximadamente 2 °C. En cuanto a las temperaturas mínimas (figura 7), el comportamiento es diferente, ya que se observan valores similares para una confiabilidad y otra, es decir, para el 50 % se obtienen valores similares para los tres modelos, semejante a lo que pasa para el 98 %. En todos los casos, existen diferencias entre una confiabilidad y otra para cada modelo.



FIGURA 6. COMPORTAMIENTO DE LAS TEMPERATURAS MÁXIMAS DEL PAVIMENTO PARA CADA MODELO Y ESTACIÓN.

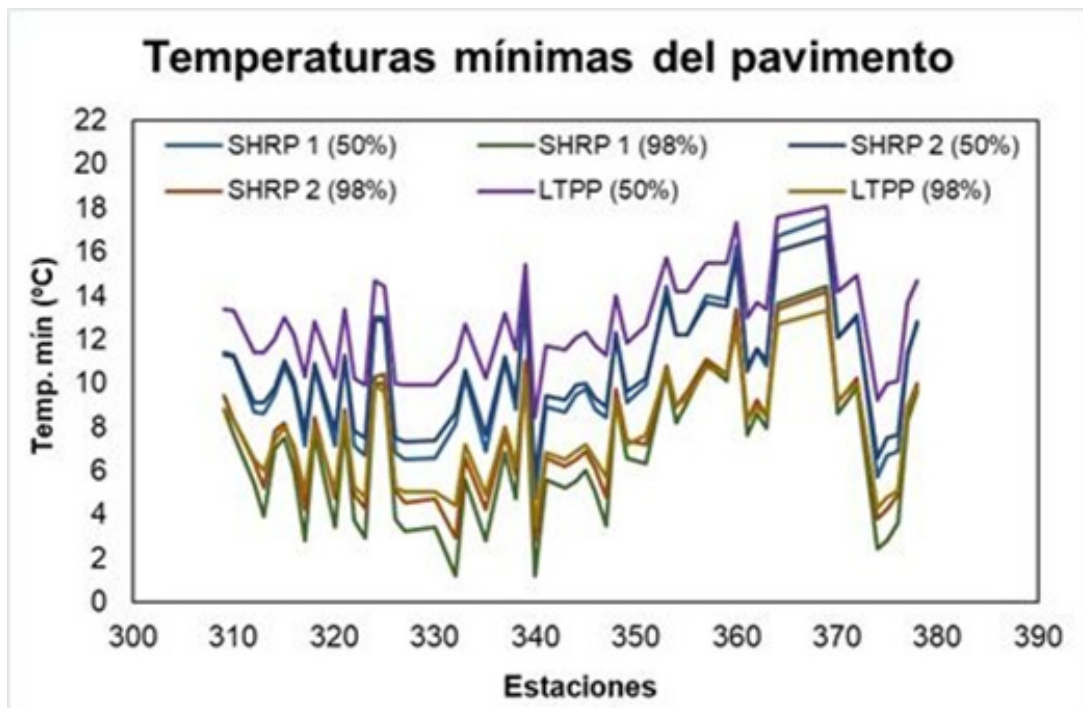


FIGURA 7. COMPORTAMIENTO DE LAS TEMPERATURAS MÍNIMAS DEL PAVIMENTO PARA CADA MODELO Y ESTACIÓN.

En las figuras 8 y 9, se relacionan la cantidad de estaciones con un determinado grado PG máximo y mínimo. Se observa que, para los modelos SHRP₁ y SHRP₂ para ambos niveles de confianza, se obtienen estaciones con grados de temperaturas máximas para 58 °C y 64 °C (figura 8). No así en el caso del modelo LTPP, que, para el 50 % de confiabilidad, todas las estaciones dan como resultado de temperatura máxima 58 °C, y para el 98 %, en cambio, todas clasifican para una temperatura de 64 °C. Se pone de manifiesto lo antes mencionado en cuanto a la diferencia entre los resultados del modelo LTPP para ambas confiabilidades.

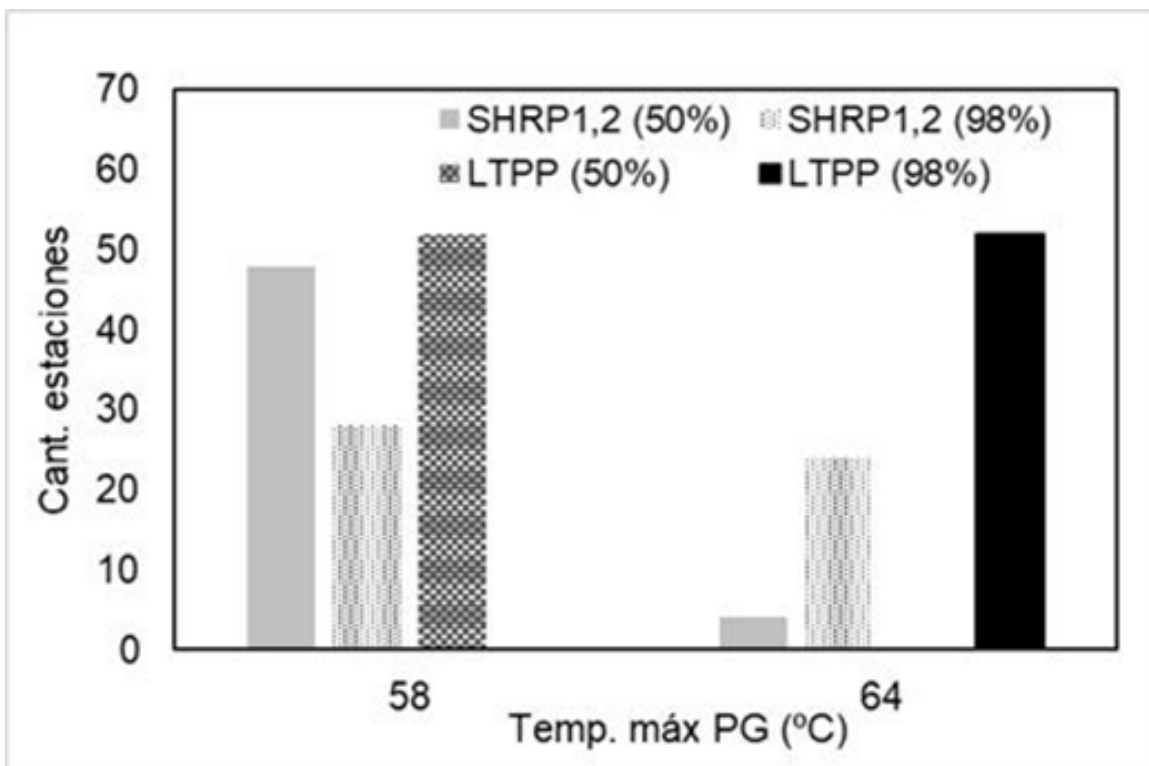


FIGURA 8. RELACIÓN DE ESTACIONES CON LOS DIFERENTES GRADOS DE DESEMPEÑO PARA LAS TEMPERATURAS MÁXIMAS.

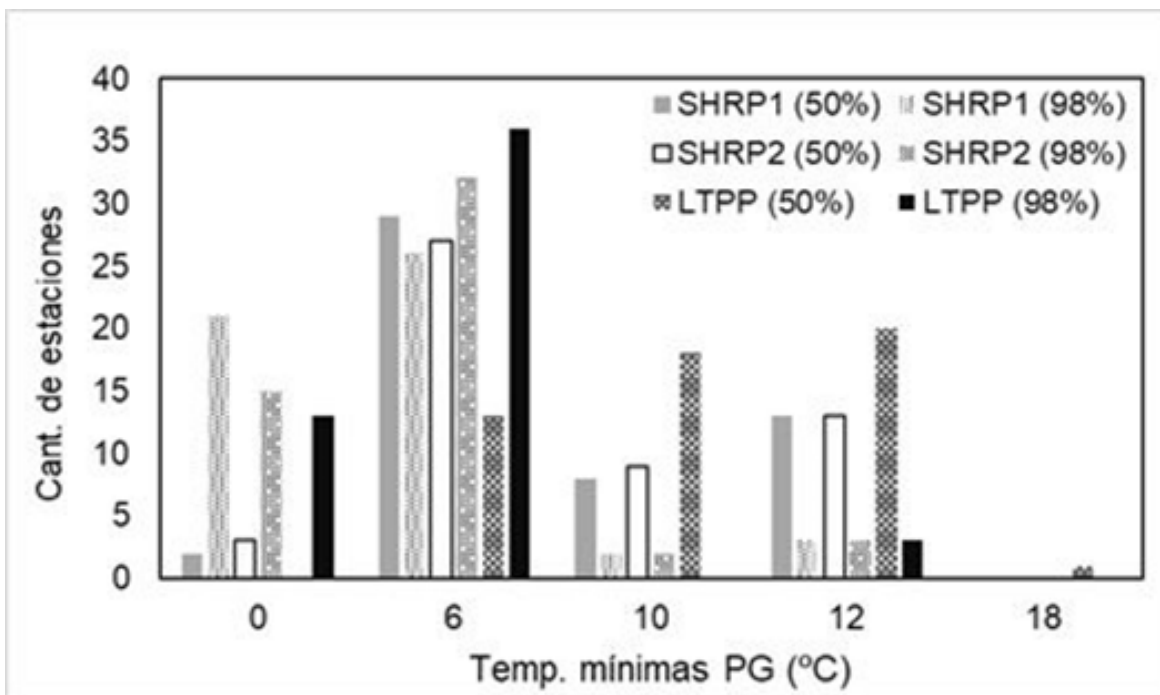


FIGURA 9. RELACIÓN DE ESTACIONES CON LOS DIFERENTES GRADOS DE DESEMPEÑO PARA LAS TEMPERATURAS MÍNIMAS.

En el caso de las temperaturas mínimas (figura 9), sucede similar, se muestra mayor representatividad de los modelos SHRP para las dos confiabilidades en cuanto a los valores mínimos de desempeño. En cambio, sigue habiendo diferencia en el modelo LTPP para una y otro nivel de confianza, aunque en 6 °C coinciden ambos.

En cuanto a las confiabilidades, en ambos modelos se obtienen resultados de mayor nivel de seguridad para el 98 %, ya que se obtienen las mayores máximas temperaturas y las menores mínimas. Como resultado de la comparación entre los modelos, se eligió el LTPP con un 98 % de confiabilidad, debido a que este posee una mayor homogeneidad en los resultados y el resto de los grados PG obtenidos para otras confiabilidades o modelos pueden ser asumidos en este. En cuanto a las temperaturas de diseño máximas del pavimento, este método mantiene el mismo grado (64°) en todas las clasificaciones, por lo que sus resultados ofrecen mayor seguridad, mientras que los valores de temperaturas mínimas de diseño varían con valores de 0°C, 6°C y 12°C.

3.5. Confección del mapa de zonificación de Cuba

Para elaborar el mapa de zonificación, se distribuyeron en un mapa los PG obtenidos por el modelo LTPP para un 98 % de confiabilidad (figura 10). Por su parte, para delimitar la zona de influencia de cada estación, se utilizó el diagrama de Voronói superpuesto con el mapa isotérmico de temperatura y con el mapa del relieve (figura 11).



FIGURA 10. ASIGNACIÓN DEL PG A CADA ESTACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO LTPP.

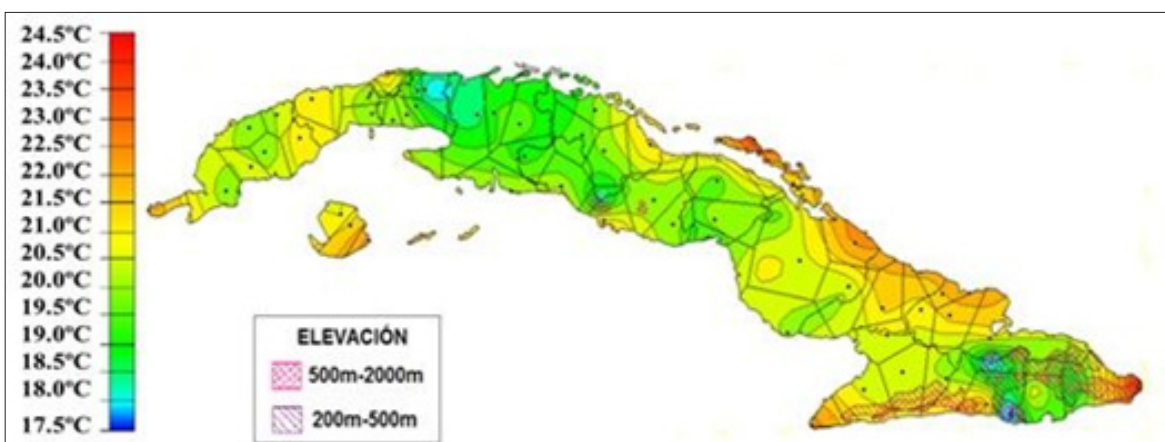


FIGURA 11. SUPERPOSICIÓN DEL MAPA DE ISOTERMAS MÍNIMAS, EL MAPA DEL RELIEVE Y EL DIAGRAMA DE VORONÓI.

Posteriormente, se evaluaron las diferencias de los PG de las estaciones colindantes y se agruparon las estaciones cercanas de iguales valores de temperatura de diseño máxima y mínima, las cuales quedaron como se observa en la figura 12.

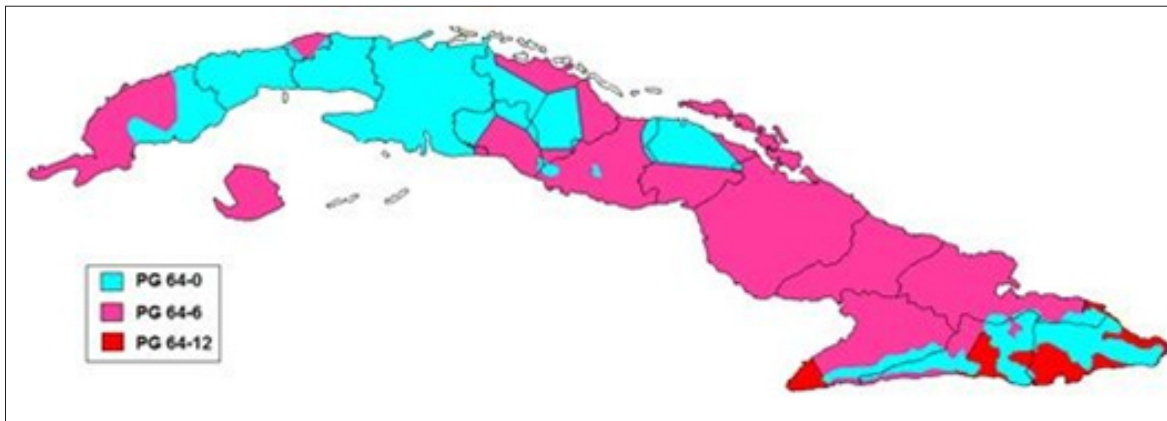


FIGURA 12. ZONIFICACIÓN DE PG EN FUNCIÓN DEL DIAGRAMA DE VORONÓI, EL MAPA DEL RELIEVE Y EL MAPA DE ZONIFICACIÓN DE CUBA.

Finalmente, haciendo un ajuste en función del comportamiento de los grados de desempeño obtenidos, se decide eliminar los grados PG 64-12 y convertirlos en PG 64-6, ya que son minoría representativa en todo el país y el PG 64-6 recoge al anterior. El mapa con la zonificación de los ligantes graduados, según grado de desempeño del sistema Superpave para toda Cuba, se muestra en la figura 13.



FIGURA 13. ZONIFICACIÓN DE CUBA SEGÚN PG RECOMENDADO.

4. CONCLUSIONES

Se determinaron las temperaturas máximas y mínimas de diseño del pavimento mediante las metodologías SHRP₁, y SHRP₂ y LTPP para cada estación estudiada. A partir de estas se les asignó un grado de desempeño (PG), de manera que se cumpliera que el

grado máximo de temperatura fuera superior a la temperatura máxima de diseño y el grado mínimo fuera inferior a la temperatura mínima de diseño. De esta manera, se garantiza que el ligante asfáltico a utilizar tendrá un comportamiento adecuado durante su vida de servicio.

Se escogió el modelo LTPP para un 98 % de confiabilidad para la confección del mapa de zonificación, ya que brindaba mayor seguridad y homogeneización en los PG obtenidos.

Se confecciona el mapa de zonificación de Cuba en consideración a los factores climáticos que influyen en la temperatura de una localidad: latitud, longitud, altitud, zona climática, que conjuntamente con el mapa de relieve, el de isotermas mínimas y el diagrama de Voronói fueron cruzados para obtener el mapa de zonificación del asfalto final.

Como resultados de la zonificación en Cuba, se definieron dos zonas de grados de desempeño (PG), las cuales están determinadas en mayor medida por los grados de temperatura mínima de diseño: 0°C y 6°C, mientras que en las temperaturas máximas solo existe un grado: 64°.

REFERENCIAS

- [1] ASTM D946. *Standard specification for penetration-graded asphalt cement for use in pavement construction*. West Conshohocken: ASTM, 2000.
- [2] J. S. Lee, J. H. Kim, O. S. Kwon y B. D. Lee, "Asphalt binder performance grading of North Korea for Superpave asphalt mix-design", *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 11, no. 6, pp. 647-654, nov. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2018.06.004>.
- [3] A. H. Gerald, *Weather Database for the Superpave TM Mix Design System*. Washington D.C: Strategic Highway Research Program, 1994.
- [4] ASTM. *Standard specification for viscosity-graded asphalt cement for use in pavement construction*. ASTM, 2013.
- [5] J. P. Aguiar-Moya, E. Rodríguez-Castro, R. E. Villegas-Villegas, L. G. Loría-Salazar, F. Leiva-Villacorta y A. Navas-Carro. (2013). *Del empirismo a la caracterización avanzada de ligantes asfálticos* [En línea]. Disponible en: <https://alfresco.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/531/DEL%20EMPIRISMO%20A%20LA%20CARACTERIZACION%20AVANZADA%20DE%20LIGANTES%20ASFALTICOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [6] R. E. Villegas-Villegas, J. P. Aguiar-Moya, L. G. Loría-Salazar, W. D. Fernández-Gómez y F. Reyes-Lizcano. (2012). *De la consistencia al desempeño: nueva tendencia en la compra*,

- control de calidad y diseño de los asfaltos en Latinoamérica* [En línea]. Disponible en: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/825>
- [7] D. O. Morales Bravo, “Zonificación de temperaturas para la evaluación y aplicación de mezclas asfálticas diseñadas según la metodología Superpave para el uso en Chile”, Tesis de grado, Universidad de Talca, Talca, Chile, 2013.
- [8] Z. Qasim, A. Abed y Z. Qasim, “Impact of the Superpave hot mix asphalt properties on its permanent deformation behavior”, en *MATEC Web of Conferences*, vol. 162, p. 01041, 2018. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816201041>
- [9] R. Delgadillo, M. Segovia, C. Wahr y G. Thenoux, “Superpave zoning for Chile”, *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 32, no. 1, pp. 25-36, 2017. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732017000100003>
- [10] A. Mohseni. (1 sep. 1998). *LTPP seasonal asphalt concrete (AC) pavement temperature models* [En línea]. Disponible en: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/40378>
- [11] S. Khedr, M. Saady y M. Khafagy, “Development of asphalt binder performance grades for Egypt”, en *The Second Australasia and South East Asia Structural Engineering and Construction Conference (ASEA-SEC-2), Sustainable Solutions in Structural Engineering and Construction*, Bangkok, Tailandia, pp. 393-398, 2014.
- [12] K. A. Ghuzlan y G. G. Al-Khateeb, “Selection and verification of performance grading for asphalt binders produced in Jordan”, *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 14, no. 2, pp. 116-124, 2013. <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.650697>
- [13] J. Morales Fournier, “Análisis para una posible adaptación en las normativas de los agregados y las mezclas asfálticas del método Superpave a Cuba”, Tesis de grado, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba, 2014.
- [14] C. Garrido Acosta, “Zonificación de temperaturas para la evaluación y aplicación de mezclas asfálticas diseñadas en Cuba según la metodología Superpave”, Tesis de grado, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba, 2016.
- [15] Y. Padilla Cruz, “Zonificación de temperatura para la evaluación y aplicación de mezclas asfálticas diseñadas en el occidente de Cuba según la metodología Superpave”, Tesis de grado, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba, 2016.
- [16] D. O. Abreu Hernández, E. Tejeda, T. E. Martínez Rojo, J. Morales Fournier y A. Alonso Aenlle, “La temperatura de cálculo para asfaltos y mezclas de pavimentos en Cuba considerando la influencia del cambio climático”, en *PIARC International Seminar on climate change adaptation, risk and disaster management for roads and road organizations*, World Road Association, La Habana, 2017.

- [17] B. K. Diefenderfer, I. L. Al-Qadi, S. D. Reubush y T. E. Freeman, “Development and validation of a model to predict pavement temperature profile”, en *TRB 2003 Annual Meeting*, Transportation Research Board, Washington D.C, 2002.
- [18] A. Mohseni. (1 jul. 1998). *LTPP data analysis: Improved low pavement temperature prediction:[tech brief]* [En línea]. Disponible en: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/38783>

