

IAG110-03-2013
ZONIFICACIÓN CLIMÁTICA DE COSTA RICA PARA LA
DETERMINACIÓN DEL TIPO DE LIGANTE ASFÁLTICO CLASIFICADO
POR GRADO DE DESEMPEÑO (PG)
ZONEAMENTO CLIMÁTICO DA COSTA RICA PARA A
DETERMINAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO CLASSIFICADO POR
GRAU DE DESEMPENHO (PG)

Fabián Elizondo Arrieta
Universidad de Costa Rica, LanammeUCR
San José, Costa Rica
fabian.elizondo@ucr.ac.cr

Elias Bonilla Miranda
Estudiante de Grado, UCR
San José, Costa Rica
elias.bonilla@gmail.com

Gustavo Badilla
Universidad de Costa Rica, LanammeUCR
San José, Costa Rica
gustavo.badilla@ucr.ac.cr

Ellen Rodriguez
Universidad de Costa Rica, LanammeUCR
San José, Costa Rica
ellen.rodriguez@ucr.ac.cr

Resumen

Las metodologías de clasificación de ligantes asfálticos se encuentran en constante evolución, esto con el fin de lograr mejores especificaciones que permitan elegir ligantes asfálticos de mejor desempeño de acuerdo con las características propias de cada proyecto. La metodología de análisis más moderna se denomina clasificación por Grado de Desempeño o PG.

El sistema de clasificación por PG establece un rango de temperaturas dentro de las cuales el asfalto se comporta de manera adecuada. Este rango debe ser cotejado con las temperaturas extremas de la zona donde se ubicará el proyecto y de esta manera definir si el asfalto es apto para ser utilizado en el proyecto. Para poder implementar en Costa Rica este sistema de clasificación es fundamental establecer una zonificación climática que permita la determinación de los tipos de ligante asfáltico que se requieren por zona.

El estudio específico consistió en el análisis de información de 47 estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo del territorio costarricense, calculando para cada una de ellas las temperaturas críticas de acuerdo con la metodología propuesta por la FHWA.

Para establecer las distintas zonas de PG se realizó un análisis estadístico con el objetivo verificar cuales de las regiones del país presentaban climas similares en función de la altitud, basado en este análisis se definieron tres zonas (Central, Caribe y Pacifico) caracterizadas por tener comportamientos distintos de las temperaturas críticas.

Una vez generados para cada zona los mapas de PG en función de la altitud, las zonas fueron delimitadas con base en: densidad de carreteras, distribución poblacional, topografía y volumen de tránsito.

Para cada una de las zonas se realiza una definición del tipo de asfalto base que debe ser utilizado en cada zona. Adicionalmente se hacen recomendaciones para la modificación del PG basados en velocidad y volumen de tránsito de la Red Vial Nacional de Carreteras.

Resumo

As metodologias de classificação de ligantes betuminosos estão em constante evolução, isto com a finalidade de conseguir melhores especificações que permitem escolher ligantes betuminosos de melhor desempenho de acordo com as características próprias de cada projeto. A metodologia de análise mais recente é chamada classificação por Grau de Desempenho ou PG.

O sistema de classificação PG fornece um intervalo de temperaturas dentro do qual o asfalto se comporta de uma maneira adequada. Este intervalo deve ser verificado contra as temperaturas extremas da área onde se localizará o projeto e, assim, determinar se o asfalto é adequado para sua utilização no projeto. A fim de implementar na Costa Rica este sistema de classificação é essencial estabelecer um zoneamento climático que permita a determinação dos tipos de ligante betuminoso requeridos por zona.

O estudo específico consistiu na análise das informações de 47 estações meteorológicas distribuídas ao longo do território da Costa Rica, calculando para cada uma delas as temperaturas críticas de acordo com a metodologia proposta pela FHWA.

Para estabelecer as diferentes zonas de PG foi feita uma análise estatística com o objetivo de verificar quais das regiões do país apresentavam climas semelhantes dependendo da altitude, com base nesta análise se definiram três zonas (Central, Caribe e Pacífico), caracterizadas por ter comportamentos diferentes das temperaturas críticas.

Uma vez gerado para cada zona os mapas de PG dependendo da altitude, as zonas foram definidas com base em: densidade de rodovias, distribuição da população, topografia e volume de tráfego.

Para cada uma destas zonas foi feito uma definição do tipo de asfalto que deve ser utilizado em cada zona. Além, são feitas recomendações para a modificação do PG baseada na velocidade e volume do tráfego da Rede Rodoviária Nacional.

INTRODUCCION

La construcción, rehabilitación y mantenimiento de la infraestructura vial es una inversión cuantiosa dentro del presupuesto de cualquier país, esta inversión y los proyectos que desarrollemos con ella tienen un impacto crucial en la economía y calidad de vida de los ciudadanos. Desarrollar herramientas que permitan mejorar el desempeño de los pavimentos, a través de la selección de mejores materiales, mejores métodos de diseño estructural, e implementación de mejores métodos constructivos y de control de calidad permitirán una inversión más eficiente de estos recursos escasos.

El ligante asfáltico es el componente más importante en el desempeño de una mezcla asfáltica, el poder caracterizarlo más detalladamente y correlacionar sus propiedades con los requerimientos del proyecto donde será utilizado ha llevado a los investigadores y al sector a mejorar los métodos de clasificación existentes pasando de métodos de clasificación empíricos a metodologías que correlacionan las propiedades fundamentales del material con su desempeño y las características del proyecto.

Dentro de esta perspectiva y tomando en cuenta el aumento en exigencias a que los pavimentos eran sometidos, en 1987 inicia en los Estados Unidos de América un proyecto denominado Programa Estratégico de Investigación en Carreteras (SHRP, por sus siglas en Inglés) que culminó con la propuesta de un nuevo sistema de diseño y análisis de diseño de mezcla asfáltica denominado Pavimentos asfálticos de comportamiento superior (SUPERPAVE, por sus siglas en inglés) y dentro de esta se desarrolló una nueva metodología de clasificación de asfaltos denominada Grado de desempeño de asfaltos (PG, por sus siglas en inglés) basada en las temperaturas extremas del pavimento que se esperan en el sitio del proyecto, y las propiedades de los asfaltos ante distintas condiciones de temperatura y diferentes condiciones de envejecimiento efecto del proceso de producción, colocación y vida útil del pavimento.

Se implementó una nueva metodología de clasificación de asfaltos con nuevos equipos de ensayo y criterios de especificación basados en las condiciones de envejecimiento y temperatura a las que el asfalto estaría sometido, con el fin de aumentar la resistencia al fisuramiento por contracción térmica, fisuramiento por fatiga y la deformación permanente de la mezcla asfáltica. Lo anterior requirió la caracterización de las temperaturas de operación de los proyectos, los cuales se basaron en las temperaturas críticas de pavimento (máximas, mínimas y promedio) las cuales fueron corregidas mediante modelos de correlación para transformar las temperaturas ambientales a temperaturas del pavimento.

Este proyecto de investigación determina los tipos de cemento asfáltico requeridos, según la clasificación por Grado de desempeño, recomendados a utilizar en Costa Rica en la producción de mezcla asfáltica en caliente, según la zonificación climática asociada con la temperatura del pavimento y la demanda de cargas de tránsito.

METODOLOGÍA

Determinación del grado de desempeño del asfalto asociado a un proyecto

En la metodología SUPERPAVE los requisitos que debe cumplir un asfalto permanecen constantes para todos los grados, pero las temperaturas para las cuales estos deben ser cumplidos varían dependiendo de la temperaturas del pavimento, por lo que varían en función del clima en el cual se espera que el ligante asfáltico desempeñara. Por esta razón los ligantes asfálticos son seleccionados en función de las temperaturas del pavimento (máximas, mínimas y promedio) de la zona donde se ubica el proyecto, definiendo un rango de temperaturas con base en la temperatura máxima y la temperatura mínima del pavimentos y caracterizado también por una temperatura promedio.

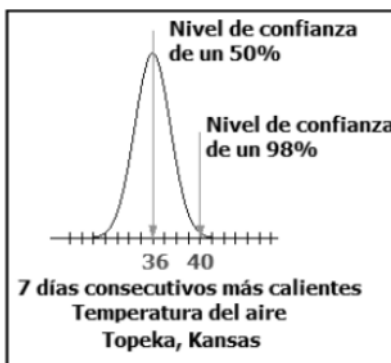
Temperaturas críticas del pavimento

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 para esos siete días, siendo este promedio el mayor de los 359 conjuntos de siete días consecutivos que existen en el año. En el caso de la temperatura mínima se escoge la temperatura menor de cada año de registro. Tanto para la temperatura máxima y mínima del aire se debe calcular el promedio y desviación estándar para todos los años de registro.

Confiabilidad según SUPERPAVE

A las temperaturas del aire la metodología les incorpora la confiabilidad, esto con el fin de que el diseñador defina la probabilidad en la cual la temperatura real no excederá la temperatura de diseño. La Figura 1 muestra la curva de distribución de frecuencias de datos de temperatura del aire característica de una estación, en la cual la temperatura promedio máxima del aire para los siete días es de 36°C (temperatura de diseño) con una desviación estándar de 2°C, entonces si el diseñador selecciona una confiabilidad del 50% tendrá un 50% de probabilidad de que la temperatura real supere los 36°C, en cambio, si selecciona una confianza del 98% tendrá solo un 2% de probabilidad de que la temperatura de diseño (40°C) se vea superada.

Figura 1: Curva de distribución de temperatura del aire Topeka, Kansas



Modelos de predicción de la temperatura del pavimento

En el comienzo de la clasificación por grado de desempeño, el programa SUPERPAVE (también conocido como SHRP), desarrollo modelos para la estimación de la temperatura máxima del pavimento basados en la temperatura del aire y de la locación geográfica (latitud). Estos modelos, denominados SHRP, se desarrollaron basados en los resultados de modelos de transmisión de calor en el pavimento y consecuentes análisis de regresión.

Con el establecimiento de los programas denominados “Long Term Pavement Performance” (LTPP, por sus siglas en inglés), y el “Season monitoring program” (SMP, por sus siglas en Inglés), se creó una nueva base de datos de temperatura diarios 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 desarrollados por LTPP para la predicción de la temperatura del pavimento, además de permitir cuantificar la diferencia con los modelos existentes SHRP y poder comparar los PG calculados por ambos modelos (SHRP y LTPP)

Modelos SHRP para la predicción de la temperatura

Al principio del diseño utilizando SHRP se contaba con una base de datos limitada de la temperatura mínima del pavimento, esto debido a que no existían suficientes estaciones de registro o sus registros correspondían a un periodo muy corto. Esta falta de información hizo que SHRP asumiera la decisión conservadora de considerar la temperatura mínima del pavimento como la temperatura mínima del aire. Con el paso del tiempo SHRP logró tener mas información disponible y de esta manera pudo desarrollar un modelo para estimar la temperatura mínima del pavimento en función de la profundidad y la temperatura del aire. La ecuación para calcular la temperatura mínima del pavimento se presenta en la ecuación (1):

$$T_{\min pav} = T_{\min aire} + 0,051 \times d + 0,000063 \times d^2 \quad (1)$$

Donde:

$T_{\min pav}$ = temperatura mínima del pavimento a una profundidad d , °C,

$T_{\min aire}$ = temperatura mínima promedio del aire del registro de datos, °C,

d = profundidad a la cual se requiere calcular la temperatura en el pavimento, mm.

Para el desarrollo del modelo de temperatura máxima del pavimento se crearon sitios de registro de información a través de Estados Unidos y en cada uno de ellos se tomaron datos de temperatura del pavimento, temperatura del aire, latitud, absorción solar y velocidad del viento, de los cuales, mediante una regresión lineal se logró desarrollar un modelo de la temperatura máxima del pavimento. La ecuación (2) permite encontrar la temperatura máxima del pavimento a una profundidad de 20mm.

$$T_{\max pav} = T_{\max aire} - 0,00618 \times Lat^2 + 0,2289 \times Lat + 24,4 \quad (2)$$

Donde:

$T_{\max pav}$ = temperatura máxima del pavimento a una profundidad de 20mm, °C,

$T_{\max aire}$ = temperatura máxima promedio del aire de los 7 días más calientes, °C,

Lat = latitud de la sección (en grados).

Modelos LTPP para la predicción de la temperatura

El estudio realizado por la FHWA, con base en los datos del programa del LTPP, para comparar el modelo de temperatura mínima del pavimento de SHRP con la información recolectada por el SMP, se observó una diferencia significativa entre ambos datos, que resulta en que el modelo de la SHRP se considere conservador. En la Figura 2 se muestra la estimación de la temperatura mínima y máxima del pavimento con el modelo SHRP y los datos recolectados por el SMP.

La ecuación (3) describe el modelo obtenido por la FHWA para calcular la temperatura máxima del pavimento a niveles mayores del 50% de confianza. Por su parte la ecuación (4) permite calcular la temperatura mínima del pavimento a niveles de confianza mayores al 50%.

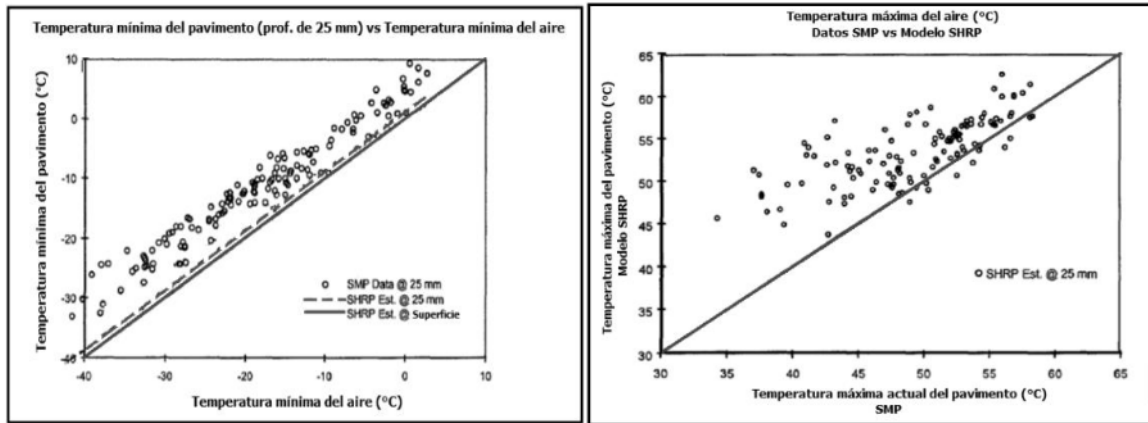
$$T_{\max \text{ pav}} = 54,32 + 0,78 \times T_{\max \text{ aire}} - 0,0025 \times \text{Lat}^2 + 15,14 \times \log(d + 25) - Z \times (9 + 0,61 \times \sigma_{\text{aire}}^2)^{0,5} \quad (3)$$

$$T_{\min \text{ pav}} = 1,56 + 0,72 \times T_{\min \text{ aire}} - 0,004 \times \text{Lat}^2 + 6,26 \times \log(d + 25) - Z \times (4,4 + 0,52 \times \sigma_{\text{aire}}^2)^{0,5} \quad (4)$$

Donde:

$T_{\max \text{ pav}}$ = temperatura máxima del pavimento a una profundidad de 20mm, °C,
 $T_{\max \text{ aire}}$ = temperatura máxima promedio del aire de los 7 días más calientes, °C,
 $T_{\min \text{ pav}}$ = temperatura mínima del pavimento a una profundidad de 20mm, °C,
 $T_{\min \text{ aire}}$ = temperatura mínima promedio del aire de los 7 días más calientes, °C,
 Lat = latitud de la sección (en grados).
 d = profundidad desde la superficie, mm,
 σ_{aire} = desviación estándar de la temperatura baja o alta del aire, °C,
 Z = es la desviación normal estándar.

Figura 2: Estimación de la temperatura mínima y máxima del pavimento con el modelo SHRP y los datos recolectados por el SMP (Fuente: FHWA)



INFORMACION GENERADA

Obtención de las temperaturas del aire y del pavimento a diferentes niveles de confiabilidad

En este estudio los datos de las estaciones meteorológicas se obtuvieron del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), y del Informe “Zonificación climática de Costa Rica para la Gestión de Infraestructura” Orozco, 2007. La definición de las temperaturas máximas, mínima y promedio está basada en la información obtenida de las 46 estaciones meteorológicas que se analizaron en este estudio, la Figura 3 muestra la ubicación de las estaciones.

La base de datos se caracterizó por ser una base de datos reciente que contemplaba como mínimo los últimos 5 años de registro, los datos de temperatura analizada estaban en base diaria, y se eligieron para que fueran representativos de las distintas zonas y climas de Costa Rica. Con base en la metodología expuesta en apartados anteriores la información para cada una de las estaciones fue procesa y se obtuvieron las temperaturas máxima, mínima y promedio del aire, en cada caso

junto con la desviación estándar. Las temperaturas críticas fueron desarrolladas para un 50, 85 y 98% de confianza.

Figura 3: Localización de las estaciones meteorológicas

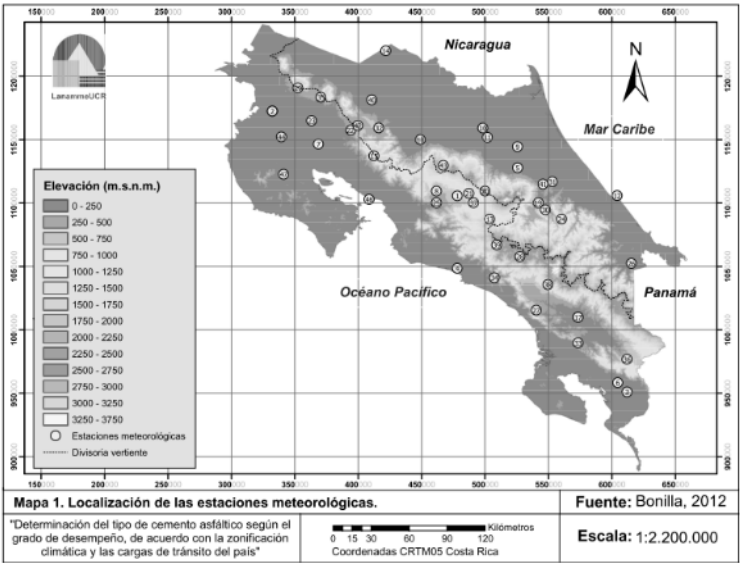


Tabla 1: Temperaturas máximas del pavimento para las estaciones meteorológicas

Estación meteorológica	SHRP (°C) Confianza=50%	SHRP (°C) Confianza=85%	LTPP (°C) Confianza=50%	LTPP (°C) Confianza=85%
Aeropuerto Daniel Oduber	60,1	60,7	58,2	61,4
Aeropuerto Juan Santamaría	54,8	55,4	54,0	57,1
Amubri	57,0	57,5	56,0	59,1
Bagaces	58,9	59,6	57,2	60,4
Bajos del Toro	48,4	50,0	48,8	52,2
Bolivia	53,4	54,2	52,9	56,1
Cajón de Boruca	57,9	58,2	56,6	59,7
Casa de Máquina Miravalles	55,0	55,6	54,0	57,2
Cedral	50,1	50,5	50,2	53,3

Posteriormente se obtuvieron las temperaturas máxima, mínima y promedio del pavimento a distintos niveles de confianza para cada una de las estaciones analizadas. A manera de ejemplo en la tabla 1 se muestran las temperaturas máximas del pavimento para estaciones calculadas a partir de las metodologías SHRP y LTPP.

Generación de mapas de grado de desempeño

Para la generación de mapas de grado de desempeño se asume una división del país basada en dos vertientes (Pacífico y Caribe), tal y como lo establece el Instituto Meteorológico Nacional y esta fue dividida en sub-zonas de acuerdo con criterios de esta misma institución. Al definir esta subdivisión se busca definir distintas zonas con condiciones climáticas internas similares pero distintas del resto. Las zonas definidas para el estudio se definen como: Pacífico sur, Pacífico Norte, Pacífico Central, Valle Central, Caribe Norte y Caribe Sur.

Para el análisis e identificación de zonas que pudieran agruparse se realizó un análisis de regresión; utilizando una herramienta estadística (variable Dummy) se valoró si las distintas zonas podrían considerarse entre ellas como significativamente distintas. En las tablas 4 y 5 se muestran los resultados estadísticos para los análisis de regresión para las temperatura máxima del aire y mínima. De los resultados encontrados se definen tres zonas con temperaturas máximas significativamente distintas entre ellas: Pacífico, Caribe y Valle Central. Por su parte, para las temperaturas mínimas, estadísticamente no existen diferencias significativas entre las distintas zonas estudiadas.

Tabla 3: Análisis de regresión para la temperatura máxima del aire

Base de datos de la temperatura máxima del aire						
Nº	Valor variable Dummy (zona)	Valor F	Valor crítico de F	Valor P - Variables modelo		
				Intercepción	Elevación	Zona
1	Pacífico= 1, Caribe= 0	119,00	1,45E-17	1,07E-44	1,95E-18	0,007794
2	Pacífico Sur= 1, demás zonas= 0	58,58	1,54E-09	3,05E-25	2,96E-10	0,907188
3	Pacífico Central= 1, demás zonas= 0	59,68	1,30E-09	5,60E-26	2,44E-10	0,553768
4	Pacífico Norte= 1, demás zonas= 0	64,02	6,73E-10	4,66E-25	1,44E-10	0,201274
5	Valle Central = 1, demás zonas= 0	68,14	3,74E-10	2,40E-26	6,74E-11	0,095259
6	Caribe Norte= 1, demás zonas= 0	62,55	5,28E-08	8,35E-20	1,82E-08	0,842715
7	Caribe Sur= 1, demás zonas= 0	62,55	5,28E-08	1,81E-18	1,82E-08	0,842715

Tabla 4: Análisis de regresión para la temperatura mínima del aire

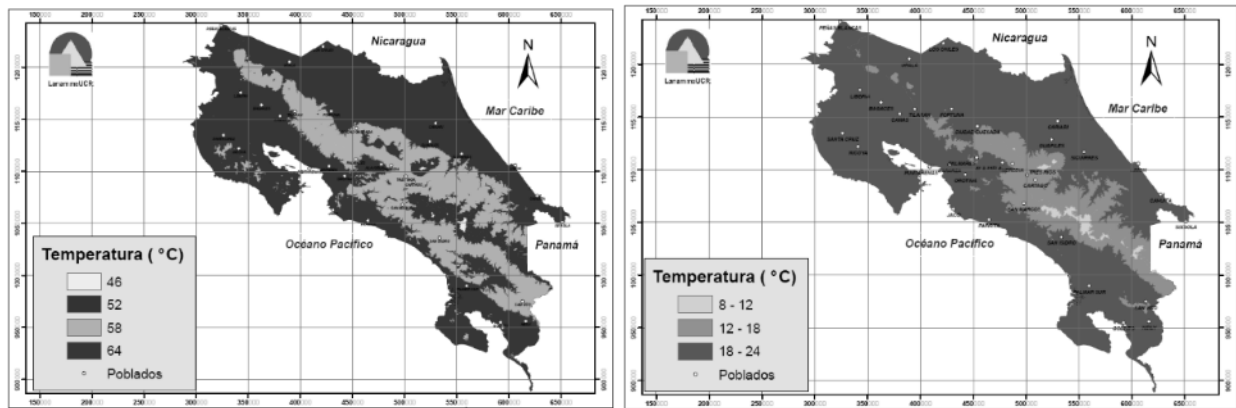
Base de datos de la temperatura mínima del aire						
Nº	Valor variable Dummy (zona)	Valor F	Valor crítico de F	Valor P - Variables modelo		
				Intercepción	Elevación	Zona
1	Pacífico= 1, Caribe= 0	381,54	1,49E-21	6,10E-38	4,08E-22	0,590355
2	Pacífico Sur= 1, demás zonas= 0	229,57	1,65E-12	4,53E-22	3,44E-13	0,527442
3	Pacífico Central= 1, demás zonas= 0	230,60	1,60E-12	2,51E-22	5,19E-13	0,494860
4	Pacífico Norte= 1, demás zonas= 0	225,01	1,93E-12	2,89E-21	6,12E-13	0,753408
5	Valle Central = 1, demás zonas= 0	230,24	1,62E-12	2,45E-22	6,21E-13	0,505721
6	Caribe Norte= 1, demás zonas= 0	118,36	1,09E-07	2,38E-15	3,10E-08	0,784354
7	Caribe Sur= 1, demás zonas= 0	118,36	1,09E-07	1,35E-13	3,10E-08	0,784354

Una vez identificadas las zonas comunes se desarrollaron modelos característicos de Grado de Desempeño (°C) en función de la elevación (m.s.n.m), para cada una de ellas. En la Tabla 6 se muestran a manera de ejemplo los distintos modelos desarrollados para la Zona Pacifico temperatura máxima del aire y pavimento y en la Figura 4 se muestran los mapas generados para las temperaturas máxima, y mínima del pavimento, desarrollados para el modelo de la FHWA LTPP.

Tabla 5: Modelos de temperatura del aire y pavimento, Zona Pacífico, temperatura máxima

Zona Pacífico			
Base de datos Temperatura máxima del aire (°C)	Modelos Temp. máxima del aire (°C)	Confiabilidad	
		50	85
		$T_{\text{aire máx}} = -0,0059 \cdot E + 35,841$	$T_{\text{aire máx}} = -0,0058 \cdot E + 36,541$
	R ²	0,883	0,881
	Modelos SHRP (°C)	Confiabilidad	
		50	85
		$T_{\text{pav SHRP}} = -0,0057 \cdot E + 58,457$	$T_{\text{pav SHRP}} = -0,0056 \cdot E + 59,125$
	R ²	0,884	0,882
	Modelos LTPP (°C)	Confiabilidad	
		50	85
		$T_{\text{pav LTPP}} = -0,0046 \cdot E + 57,011$	$T_{\text{pav LTPP}} = -0,0046 \cdot E + 60,188$
	R ²	0,883	0,884

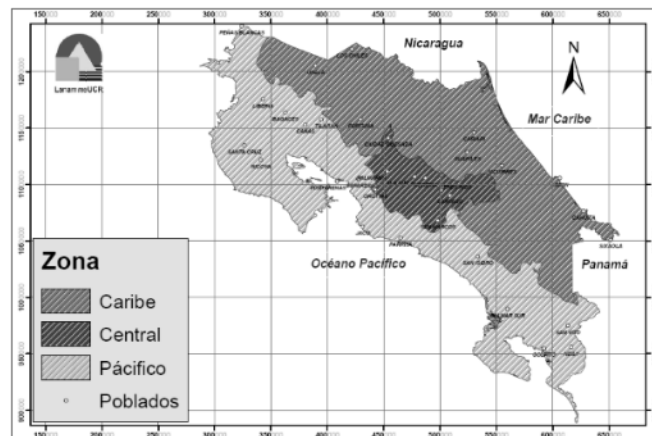
Figura 4: Temperatura máxima y mínima del pavimento, modelo FHWA-LTPP



CONCLUSIONES

Una vez generados para cada zona los mapas de Grado de Desempeño en función de la altitud, las zonas fueron delimitadas con base en: densidad de carreteras, distribución poblacional, topografía y volumen de tránsito, la delimitación de las zonas se presenta en la Figura 6.

Figura 6: Zonificación basada en el Grado de desempeño del Ligante asfáltico



Con base en el análisis de temperaturas críticas definidas para Costa Rica, se definen para cada una de las zonas un tipo de asfalto base de grado mínimo, el cual será ajustado por volumen y velocidad de tránsito de acuerdo con las siguientes recomendaciones:

1. Rutas de bajo volumen de tránsito ≤ 10 millones de ejes equivalentes de diseño (ESALS).
 - a. Zona Pacífico utilizar asfalto base modificado para lograr un PG 64-22.
 - b. Zona Caribe utilizar asfalto base modificado para lograr un PG 64-22.
 - c. Zona Central utilizar asfalto PG 58-22.
2. Rutas de medio volumen de tránsito caracterizadas por velocidades de tránsito altas (Tránsito entre 10 y 20 millones de ESALS y velocidades mayores a los 40km/h)
 - a. Zona Pacífico utilizar asfalto base modificado para lograr un PG 70-22.
 - b. Zona Caribe utilizar asfalto base modificado para lograr un PG 70-22.
 - c. Zona Central utilizar asfalto PG 64-22.
3. Rutas de medio y alto volumen de tránsito caracterizadas por velocidades de tránsito bajas (Tránsito ≥ 20 millones de ESALS y velocidades menores a los 40km/h)
 - a. Zona Pacífico utilizar asfalto modificado con polímero para lograr un PG 76-22.
 - b. Zona Caribe utilizar asfalto base modificado para lograr un PG 76-22.
 - c. Zonas Central y Caribe utilizar asfalto modificado con polímero para lograr un PG 70-22.

REFERENCIAS

Federal Highway Administration (FHWA). (1998). LTPP seasonal Asphalt Concrete (AC) pavement Temperature Models. Estados Unidos FHWA.

Everitt, P. R. Prediction of asphalt pavement temperaturas in South Africa. Durban: University of Natal, 2001.

Orozco O, E. Zonificación Climática de Costa Rica para la gestión de la Infraestructura Vial. Universidad de Costa Rica, 2007.