

Termografía Infrarroja Para Correlacionar Temperatura De Mezcla Asfáltica Y Condiciones Ambientales De Portoviejo

Infrared Thermography To Correlate Asphalt Mixture Temperature And Environmental Conditions In Portoviejo

Autores

Kelvin José Franco Mera¹, Eduardo Tejeda Piusseaut²

¹Estudiante de Posgrado. Maestría Académica con trayectoria profesional en Ingeniería Civil, Mención Vialidad. Facultad de Posgrado. Universidad Técnica de Manabí, Ecuador. email: kfranco2884@utm.edu.ec

²Docente Titular Principal Nivel 1. Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Universidad Técnica de Manabí, Ecuador. email: eduardo.tejeda@utm.edu.ec

RESUMEN

La termografía infrarroja es una técnica que permite medir la temperatura de objetos a distancia mediante la detección de la radiación infrarroja que emiten, sin necesidad de luz visible. El objetivo del siguiente estudio es determinar la temperatura superficial del pavimento asfáltico en varias calles de Portoviejo, Ecuador aplicando la termografía. Se recopilieron datos de temperatura ambiente y humedad relativa para desarrollar un modelo de correlación entre la temperatura de la mezcla asfáltica y estas variables ambientales. Tras un análisis estadístico, se evaluaron modelos polinómicos y lineales, determinándose que el modelo lineal era el más adecuado, al explicar el 66.6% de la variabilidad en la temperatura del pavimento. Este modelo resulta útil para identificar la temperatura crítica de la capa asfáltica y ajustar su resistencia en el diseño de pavimentos de acuerdo con las condiciones climáticas locales. Los resultados demuestran que la termografía infrarroja es una herramienta eficaz para la evaluación no destructiva de pavimentos, aportando mejoras significativas en el diseño de pavimentos flexibles y la gestión de la conservación vial.

Palabras clave: Termografía infrarroja, temperatura superficial del pavimento, pavimento flexible.

ABSTRACT:

Infrared thermography is a technique that allows measuring the temperature of objects at a distance by detecting the infrared radiation they emit, without the need for visible light. In this study, it was used to record the surface temperature of the asphalt pavement in several streets in Portoviejo, Ecuador. In addition, ambient temperature and relative humidity data were collected to develop a correlation model between the temperature of the asphalt mixture and these environmental variables. After a statistical analysis, polynomial and linear models were evaluated, determining that the linear model was the most suitable, explaining 66.6% of the variability in pavement temperature. This model is useful for identifying the critical temperature of the asphalt layer and adjusting its resistance in the design of pavements according to local climatic conditions. The results demonstrate that infrared thermography is an effective tool for the non-destructive evaluation of pavements, providing significant improvements in the design of flexible pavements and road maintenance management.

Keywords: Infrared thermography, pavement surface temperature, flexible pavement.

Nota Editorial: Recibido: Agosto 2024 Aceptado: Octubre 2024

Un pavimento está compuesto por un conjunto de capas superpuestas, dispuestas de manera relativamente horizontal, diseñadas y construidas con materiales apropiados y debidamente compactados. Estas estructuras estratificadas descansan sobre la subrasante, que se obtiene mediante el movimiento de tierras durante el proceso de construcción, y deben resistir eficazmente los esfuerzos generados por las cargas repetidas del tránsito a lo largo de su vida útil [1].

Según [2], un pavimento flexible está compuesto por sub-base, base y capa asfáltica. La capa asfáltica debe proporcionar una superficie uniforme que pueda resistir el tráfico y las condiciones climáticas, distribuyendo eficazmente las cargas vehiculares para minimizar tensiones. Las características fundamentales de un pavimento flexible incluyen resistencia estructural, capacidad de deformación, durabilidad y confort.

La temperatura se identifica como uno de los factores ambientales que afectan directamente el comportamiento de los pavimentos flexibles o asfálticos, alterando su rigidez debido a las propiedades termoplásticas de las capas asfálticas superficiales que los componen. Según las investigaciones de [3], es crucial considerar la temperatura ambiente al diseñar y mantener pavimentos flexibles, ya que los cambios en la rigidez pueden tener un impacto significativo en su desempeño. Además, se enfatiza la importancia de diseñar considerando esta influencia térmica para asegurar la resistencia de las mezclas incluso en condiciones adversas.

La termografía infrarroja (**TI**) es una técnica que permite medir la temperatura de diferentes objetos y materiales a distancia, captando la intensidad de radiación infrarroja que emiten los cuerpos. Es una tecnología avanzada que utiliza cámaras para capturar imágenes de la radiación infrarroja emitida por los cuerpos, sin necesidad de luz visible. Esta radiación está directamente relacionada con la temperatura de la superficie del objeto, lo que permite a la cámara calcular y mostrar dicha temperatura.

Según [4], la termografía infrarroja permite examinar grandes áreas en cortos períodos de tiempo, por lo que esta tecnología es crucial en diversas aplicaciones por su capacidad para detectar anomalías imperceptibles al ojo humano.

La energía térmica es una propiedad esencial de los cuerpos y objetos, siendo fundamental en diversas aplicaciones industriales donde se requiere su medición [5]. Por ejemplo, en ingeniería civil se emplea para medir la temperatura del concreto antes de su colocación, estimar la evaporación del agua en embalses mediante la temperatura ambiental, y calcular gradientes de temperatura para prever deformaciones en elementos estructurales.

En la década de mediados del siglo XX, se crearon las primeras cámaras capaces de detectar esta radiación para aplicaciones militares. Sin embargo, no fue hasta principios del siglo XXI que, gracias al rápido avance en microtecnología, se diseñaron cámaras infrarrojas mucho más simples, livianas y compactas. En un futuro cercano, es probable que esta tecnología esté presente en una amplia gama de dispositivos electrónicos [6].

La termografía infrarroja se fundamenta en el principio de que todo objeto cuya temperatura supere el cero absoluto emite radiación infrarroja. Una cámara termográfica detecta esta radiación y la convierte en una imagen térmica que muestra la distribución de temperatura en la superficie del objeto. Para interpretar correctamente estas imágenes, es crucial entender las limitaciones de resolución y conocer las capacidades específicas de las cámaras termográficas.

Por lo tanto, la medición del calor ha sido y seguirá siendo una actividad importante tanto en la ingeniería civil como en la vida cotidiana. En la actualidad, se disponen de varios tipos de termografía que se utilizan como herramientas de diagnóstico en la ingeniería civil. Estas técnicas permiten identificar los materiales utilizados en la construcción de edificaciones y detectar anomalías tanto estructurales como térmicas. Sin embargo, es fundamental tener en cuenta la principal limitación de la termografía [1].

En obras civiles, es posible detectar anomalías mediante el análisis del comportamiento y estado térmico de las estructuras, considerando la relación entre fenómenos mecánicos y efectos térmicos. Los daños se identifican por las alteraciones en las propiedades térmicas locales, como la conducción y la capacidad de calor. Recientemente, se han introducido nuevos materiales para tuberías, principalmente polímeros compuestos, lo que permite inspeccionarlas con el uso de la Termografía [7].

En el contexto específico de los pavimentos flexibles, esta técnica es especialmente relevante debido a la notable influencia que la temperatura ambiente tiene en el comportamiento de estas superficies. La termografía infrarroja es una herramienta eficaz para el análisis de fisuras en pavimentos flexibles, ya que permite obtener información que no es visible a simple vista, como la identificación de la sección crítica, el epicentro de la fisura y la trayectoria de las fisuras. Estos datos son importantes para comprender el comportamiento de las fisuras y aplicar tratamientos correctivos adecuados, contribuyendo así a una gestión más eficiente de las vías [8]. Ofrece una oportunidad innovadora, la permitir correlacionar la temperatura ambiente con la del pavimento, proporcionando datos esenciales para mejorar el diseño y el mantenimiento eficiente de las vías.

La termografía infrarroja (TI) presenta como principal limitación su dependencia de las condiciones ambientales, particularmente la temperatura y la humedad, que pueden influir en la precisión de las mediciones térmicas. Estos factores afectan la radiación infrarroja captada por la cámara, complicando la interpretación de las imágenes térmicas. Además, la distancia al objeto, el ángulo de visión y la reflexión de la radiación también pueden impactar la exactitud de los resultados obtenidos mediante esta técnica.

El objetivo de esta investigación es desarrollar un modelo estadístico que relacione la temperatura de la superficie del pavimento asfáltico con la temperatura ambiente y con la humedad relativa. Este modelo se empleará para determinar la temperatura crítica de la capa superficial para una determinada probabilidad, lo cual permitirá ajustar la resistencia de la mezcla en el diseño estructural, adaptándolo específicamente a las condiciones de Portoviejo.

Para lograr este objetivo, se realizaron mediciones de la temperatura de la mezcla asfáltica en la superficie, utilizando termografía infrarroja. Se buscaba obtener valores de temperatura en la mezcla, que reflejaran las condiciones locales, simultáneamente registrando la temperatura ambiente y humedad relativa en esos puntos, localizados en lugares previamente escogidos dentro de la ciudad. Los lugares seleccionados para estudio estuvieron ubicados en las calles: Wilfrido Lora, Reales Tamarindos, Paso Lateral Manabí – Guillen y Avenida Urbina. Estos datos fueron utilizados para desarrollar un modelo matemático sólido y confiable que relacione la temperatura del pavimento, con las variables temperatura ambiente y humedad relativa.

2. LA TEMPERATURA EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

La temperatura es un factor fundamental en el diseño de pavimentos, ya que influye directamente en las propiedades mecánicas de los materiales utilizados y en el comportamiento del pavimento bajo cargas y condiciones ambientales variables. En el método de diseño de pavimentos de la Guía AASHTO (Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y de Transporte) [9]. La temperatura se considera principalmente a través de dos factores:

○ Viscosidad del asfalto

La temperatura influye significativamente en la viscosidad de los materiales asfálticos utilizados en la construcción de pavimentos. A temperaturas más altas, el asfalto se vuelve más fluido, mientras que, a temperaturas más bajas, se vuelve más rígido y frágil. Esto afecta directamente la capacidad del pavimento para soportar cargas y deformaciones. El método ajusta los parámetros del diseño, como el espesor de la capa asfáltica, basándose en las temperaturas esperadas en la vida útil del pavimento.

○ Variación estacional de la temperatura ambiente

La temperatura ambiental varía a lo largo del año, y esta variación estacional puede tener un impacto significativo en el comportamiento del pavimento. Por lo tanto, en el diseño de pavimentos, se consideran las temperaturas máximas y mínimas esperadas durante el año en la ubicación específica del proyecto. Estos datos se utilizan para calcular los esfuerzos y deformaciones que experimentará el pavimento bajo diferentes condiciones climáticas, permitiendo dimensionar adecuadamente los materiales y la estructura del pavimento para resistir estas variaciones.

En resumen, la AASHTO 93 tiene en cuenta la temperatura en el diseño de pavimentos mediante la consideración de sus efectos en las propiedades de los materiales utilizados y en la variación estacional de la temperatura para estimar el comportamiento del pavimento bajo diferentes condiciones climáticas. Esto garantiza que los pavimentos diseñados de acuerdo con este método sean capaces de soportar adecuadamente las condiciones térmicas a las que estarán expuestos durante su vida útil [9].

3. MODULO DINÁMICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.

El módulo dinámico de una mezcla asfáltica (M_d), módulo de elasticidad (E_a), es una medida de su rigidez o resistencia a la deformación bajo carga y condiciones dinámicas, como las del tráfico vehicular. Existe una relación inversa entre la temperatura del pavimento y el módulo dinámico de la mezcla asfáltica. A medida que la temperatura del pavimento aumenta, el módulo dinámico disminuye debido a la reducción en la viscosidad del asfalto y a la mayor flexibilidad de la mezcla. Por el contrario, a temperaturas más bajas, el módulo dinámico aumenta, lo que indica que la mezcla se vuelve más rígida y menos deformable [10].

El procedimiento cubre un amplio intervalo tanto de temperatura como de frecuencia de carga. La serie de ensayos mínima recomendada incluye temperaturas de 5, 25 y 40°C (42, 77 y 104°F) y frecuencias de cargas de 1, 4 y 16Hz para cada temperatura [10].

4. PRINCIPIOS DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA

Todos los objetos con temperatura por encima del cero absoluto (0 K) emiten radiación en la banda infrarroja del espectro electromagnético. Esta radiación infrarroja se extiende desde 0.75 hasta 1000 μm (micrómetros), ubicándose entre la banda visible y las microondas.

La termografía utiliza la banda espectral del infrarrojo. En el extremo de longitud de onda corta, la frontera se encuentra justo en el límite de la percepción visual, en el rojo profundo, mientras que en el extremo de longitud de onda larga se superpone con las longitudes de onda de las microondas, en el intervalo del milímetro.

Frecuentemente, la banda del infrarrojo se divide en cuatro bandas menores con límites arbitrarios: infrarrojo cercano (0.75-3 μm), infrarrojo medio (3-6 μm), infrarrojo lejano (6-15 μm) e infrarrojo extremo (15-100 μm) (Figura 1).

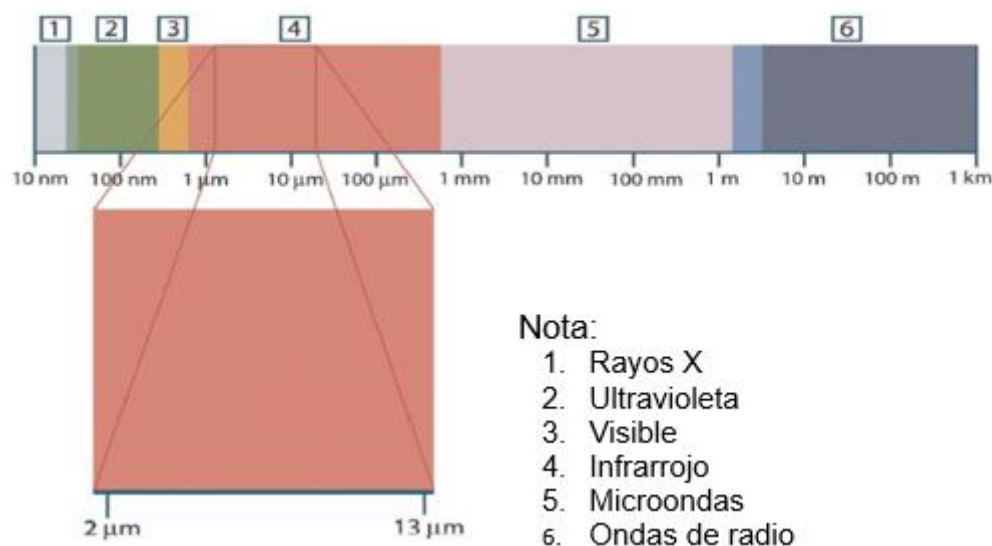


Figura 1. Espectro electromagnético [11].

La energía térmica irradiada por un objeto se expresa en función de la energía emitida por un radiador perfecto conocido como cuerpo negro o ideal [2]. La cámara convierte la radiación infrarroja en una imagen visible de temperatura, conocida como termograma.

La termografía infrarroja (TI) se clasifica en dos tipos: activa y pasiva. En el modo activo, se aplica un estímulo externo para generar calor en un objeto que no lo produce por sí mismo, mientras que, en el modo pasivo, el dispositivo de investigación genera calor por conducción, convección o por radiación. En el caso de pavimentos, la TI se clasifica como pasiva, ya que el calor que se detecta en el pavimento es producto de la radiación solar [12].

La Emisividad (ϵ) define la capacidad de un material para emitir energía, y está fuertemente correlacionada con sus características superficiales. Los valores de emisividad pueden variar entre 0 (reflector/espejo perfecto) y 1 (emisor/cuerpo negro perfecto). Esta puede definirse como la relación entre la radiación emitida por la superficie (R_t) y la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura. Por consiguiente, el flujo de energía emitido por un cuerpo real siempre será una fracción de la energía emitida por un cuerpo negro a esa misma temperatura [13].

La emisividad de una mezcla asfáltica puede variar dependiendo de varios factores, como la composición del asfalto, la textura superficial, la presencia de agregados o aditivos, y las condiciones ambientales. Es importante tener en cuenta que la emisividad puede ser influenciada por la contaminación superficial, la suciedad, la humedad o el envejecimiento del pavimento, lo que podría alterar la capacidad de la superficie para emitir radiación térmica de manera eficiente.

La emisividad de una mezcla asfáltica puede variar dependiendo de varios factores, como la composición del asfalto, la textura superficial, la presencia de agregados o aditivos, y las condiciones ambientales. Es importante tener en cuenta que la emisividad puede ser influenciada por la contaminación superficial, la suciedad, la humedad o el envejecimiento del pavimento, lo que podría alterar la capacidad de la superficie para emitir radiación térmica de manera eficiente.

5. METODOLOGÍA

La investigación se ha desarrollado siguiendo varios pasos.

- a) Selección de puntos para la toma de datos. Identificación de ubicaciones representativas en la ciudad que cubran diferentes tipos y edades de pavimento asfáltico. En la figura 2 se muestran los puntos seleccionados en la ciudad para las mediciones.
- b) Medición de temperatura del pavimento y variables ambientales.
 - Utilización de una cámara termográfica para mediciones periódicas de la temperatura del pavimento variando el momento del día. Para la obtención de las imágenes termográficas se utilizó una cámara FLUKE, modelo Tis65 (tabla 1) y las imágenes fueron procesadas y analizadas mediante el programa SmartView 3.10,
 - Registro de la temperatura ambiente con un termómetro digital y captura de la humedad relativa simultáneamente.
- c) Análisis de datos. Utilizar herramientas gráficas para explorar y describir las relaciones entre la temperatura del pavimento y las variables ambientales.
- d) Modelos de correlación. Evaluar modelos lineales y no lineales para establecer las relaciones entre la temperatura del pavimento (variable dependiente) y la temperatura ambiente junto con la humedad relativa (variables independientes). Selección del modelo estadístico más adecuado, destacando los coeficientes de correlación y la significancia estadística.
- e) Interpretación y recomendaciones.
 - Interpretar los resultados para entender cómo las variables ambientales afectan la temperatura del pavimento.
 - Proporcionar recomendaciones prácticas basadas en los hallazgos para mejorar el diseño urbano, la gestión del pavimento, o medidas de adaptación al clima.

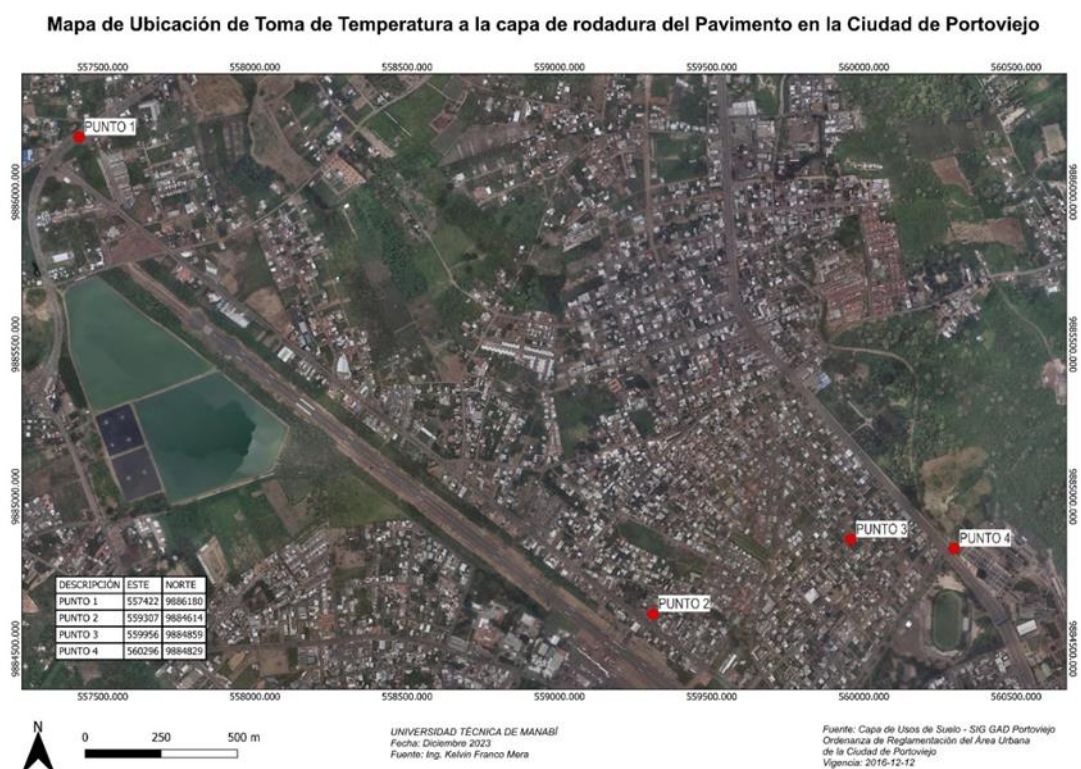


Figura 2. Ubicación de los lugares de toma de temperatura.

Tabla 1. Especificaciones Cámara infrarroja Fluke TiS65

Características principales	
CDVI (resolución espacial)	2.4 mRad
Resolución de detector	260 x 195
Campo de visión	35.7 ° x 26.8 °
Distancia hasta el punto de exploración	417:1
Conectividad inalámbrica	Sí
Compatible con la aplicación Fluke Connect®	Sí (donde esté disponible)
Medición de temperatura	
Precisión	±2 °C o 2 % (a 25 °C nominales, lo que sea mayor)
Corrección de emisividad en pantalla	Sí (tanto valor como tabla)
Compensación de la temperatura de fondo reflejada en la pantalla	Sí
Corrección de transmisión en pantalla	Sí
Especificaciones generales	
Alarmas de colores (alarmas de temperatura)	Temperatura alta, temperatura baja, isotermas
Banda espectral infrarroja	7.5 µm a 14 µm
Temperatura de funcionamiento	-10 °C a +50 °C
Temperatura de almacenamiento	-20 °C a +50 °C (-4 °F a 122 °F)
Humedad relativa	10 % a 95 %, sin condensación

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

La figura 3 muestra una imagen termográfica de uno de los puntos de medición de temperatura, ofreciendo un ejemplo visual de los resultados capturados por la cámara.

En general, la emisividad de superficies asfálticas típicas suele estar en el rango de 0.90 a 0.95, lo que indica que estas superficies absorben y emiten aproximadamente entre el 90% y el 95% de la radiación térmica que emitiría un cuerpo negro a la misma temperatura. Según el manual del usuario del programa SmartView 3.10, se recomienda un valor de emisividad de 0.93 para aplicaciones generales, que se encuentra dentro del rango característico de las mezclas asfálticas.

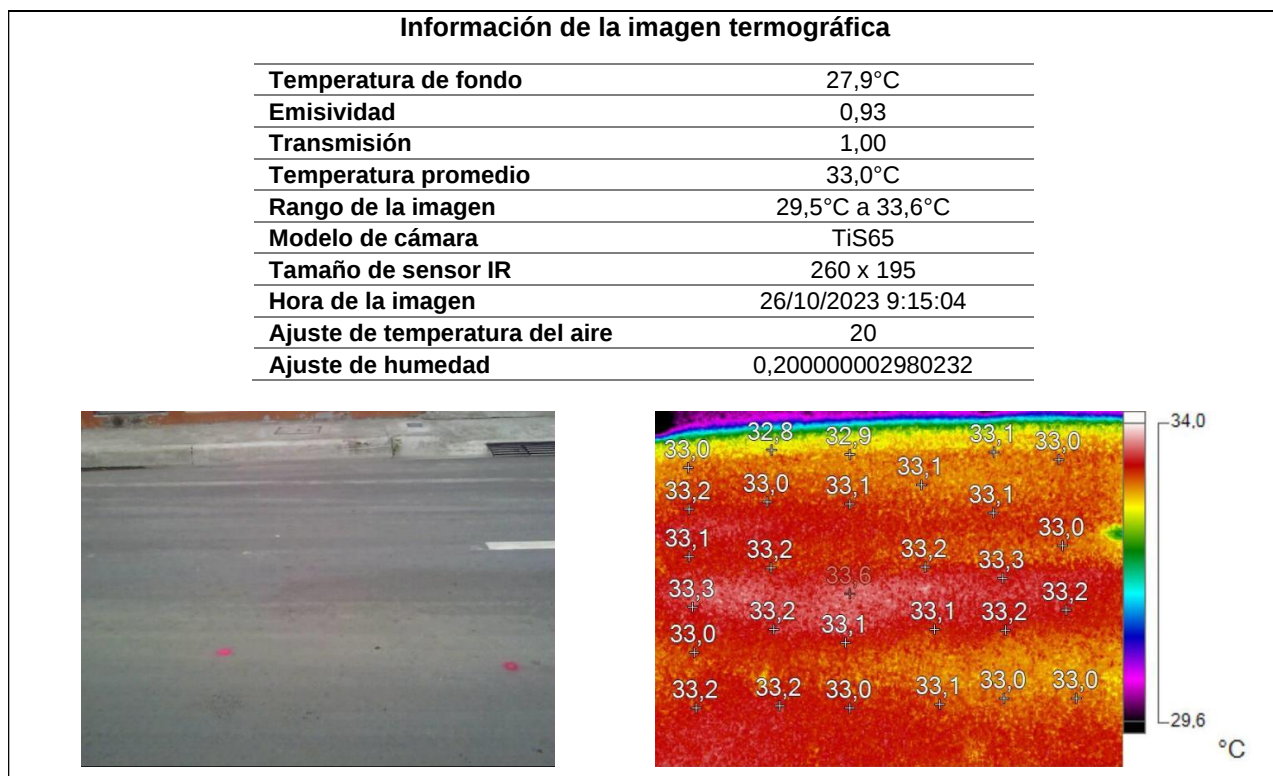


Figura 3. Imagen con la luz visible e imagen termográfica de una captura, con la información arrojada por el programa SmartView 3.10. Emisividad de 0,93.

La Tabla 2 presenta los valores registrados de temperatura ambiente y porcentaje de humedad relativa, los cuales fueron considerados como variables independientes en el modelo de regresión.

Tabla 2. Datos de toma de muestras de temperaturas ambiente y humedad relativa.

Item	Dirección	Fecha	Hora	Temperatura ambiente (°C)	Humedad (%)
Toma 1	Calle Wilfrido Loor y Luis Villacreces	26/10/2023	9:15 A.M.	27,9	74,6
Toma 2		1/11/2023	12:24 P.M.	36,5	49,7
Toma 3		16/11/2023	11:50 A.M.	30,2	66,5
Toma 4		23/11/2023	12:00 M	38,4	47,6
Toma 1	Av. Reales Tamarindos y Calle Atanasio Santos.	26/10/2023	9:23 A.M.	30,4	70,6
Toma 2		1/11/2023	12:32 P.M.	36,1	50,8
Toma 3		16/11/2023	12:05 P.M.	36,1	59,2
Toma 4		23/11/2023	12:18 P.M.	32,7	49,7
Toma 1	Paso Lateral Manabí - Guillen (Intersección Av. Reales Tamarindos)	26/10/2023	9:37 A.M.	29,8	65,8
Toma 2		1/11/2023	12:41 P.M.	35,1	51,9
Toma 3		16/11/2023	12:12 P.M.	31,5	56,5
Toma 4		23/11/2023	12:28 P.M.	31,4	57,2
Toma 1	Av. Urbina (Sentido Portoviejo - Crucita) Semáforo Parque Rotonda.	26/10/2023	9:57 A.M.	30,6	62,8
Toma 2		1/11/2023	12:59 P.M.	32,9	60,6
Toma 3		16/11/2023	12:32 P.M.	35,6	58,3
Toma 4		23/11/2023	13:55 P.M.	30,5	61,6

Análisis de datos.

Las figuras 4(a) y 4(b) muestran las tendencias de las variables independientes temperatura ambiente y humedad relativa, respectivamente, correlacionadas con las temperaturas medidas en el pavimento. Se observa que a medida que aumenta la temperatura ambiente, también lo hace la temperatura registrada en el pavimento. Por otro lado, con la humedad relativa ocurre lo contrario: a medida que esta aumenta, la temperatura del pavimento disminuye.

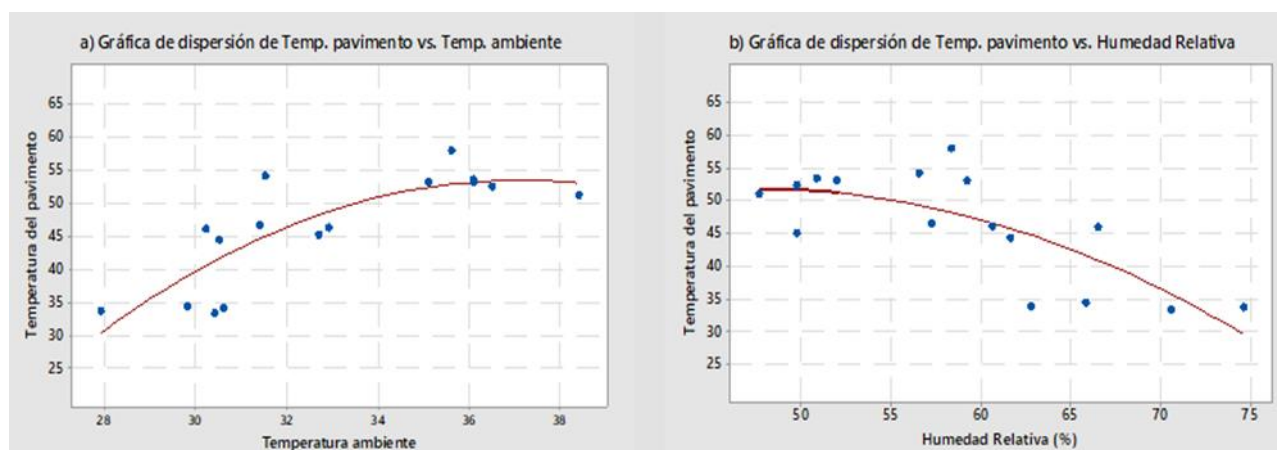


Figura 4. Gráficos que relacionan las temperaturas medidas en el pavimento con la cámara termográfica y con las variables (a) temperaturas ambientes y (b) humedad relativa.

En la figura 4a, la línea de tendencia polinómica de orden 2 muestra una buena relación entre la temperatura del pavimento y la temperatura ambiente, con un valor de R^2 igual a 0,6504. Asimismo, la relación entre la temperatura del pavimento y la humedad relativa también sugiere una cierta dependencia entre las variables, con un valor de R^2 igual a 0,6239. Por lo tanto, ambas variables independientes influyen en la temperatura registrada en el pavimento de manera opuesta.

Modelo de Regresión.

Se utilizó el software Minitab 18 para realizar el análisis de regresión, generando ecuaciones que describen la relación entre uno o más predictores y la variable de respuesta. Se midió la temperatura del pavimento en grados centígrados como variable dependiente y se utilizaron dos predictores: la temperatura ambiente en grados centígrados y la humedad relativa en porcentaje.

Se evaluaron tanto un modelo polinómico como uno lineal, concluyendo que el modelo lineal es suficiente, ya que el modelo polinómico no mostró diferencias significativas respecto al modelo lineal. En la regresión lineal, se emplea el método de mínimos cuadrados ordinarios para estimar la ecuación, minimizando la suma de los cuadrados de los residuos. Este método es crucial para obtener una ecuación que modele adecuadamente la relación entre las variables analizadas. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 3, 4 y 5.

Tabla 3. Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	2	1615,62	807,812	35,89	0,000
Temperatura ambiente	1	184,43	184,435	8,19	0,007
Humedad relativa	1	76,31	76,314	3,39	0,074
Error	36	810,33	22,509		
Falta de ajuste	13	791,35	60,873	73,73	0,000
Error puro	23	18,99	0,826		
Total	38	2425,96			

Tabla 4. Resumen del Modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
4,744	66,60%	64,74%	60,69%

Tabla 5. Coeficientes del modelo de regresión

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	22,6	25,1	0,90	0,373	
Temperatura ambiente	1,321	0,461	2,86	0,007	3,50
Humedad relativa	-0,340	0,185	-1,84	0,074	3,50

El modelo lineal obtenido queda de la forma:

$$T_{pav} = 22.6 + 1.321 * T_{amb} - 0.340 * H_r$$

Donde:

T_{pav} : Temperatura superficial del pavimento (°C)

T_{amb} : Temperatura ambiente (°C)

H_r : Humedad Relativa (%)

Los resultados de la regresión indican que ambos predictores son estadísticamente significativos debido a que los valores del estadígrafo p son inferiores a 0,05. Juntos, los dos predictores explican el 66.60% de la varianza de la temperatura del pavimento. Un análisis del modelo lineal obtenido permite señalar los siguientes puntos:

- Por cada aumento de 1 grado centígrado en la temperatura ambiente, se espera que la temperatura del pavimento aumente en 1,321 grados centígrados.
- Los resultados del análisis de regresión destacan la dirección, el tamaño y la significancia estadística de la relación entre cada predictor y la respuesta. Por lo tanto, el signo positivo asociado a la temperatura ambiente indica que conforme esta aumenta, también lo hace la temperatura del pavimento. En contraste, el signo negativo relacionado con la humedad relativa sugiere que un aumento en esta variable está asociado con una disminución en la temperatura del pavimento.
- El valor p de cada coeficiente evalúa la hipótesis nula de que el coeficiente es igual a cero (sin efecto). Por lo tanto, los valores de p obtenidos indican que los predictores son significativos en el modelo analizado, ya que la probabilidad de que la relación observada entre el predictor y la variable dependiente sea debida al azar es muy pequeña, para un nivel de significancia de **0,10** (10%).
- Los coeficientes reflejan el cambio medio en la respuesta por cada unidad de cambio en el predictor, manteniendo constantes los demás predictores incluidos en el modelo. Se observa que la temperatura ambiente tiene una influencia más significativa en la temperatura del pavimento que la humedad relativa medida en el momento.

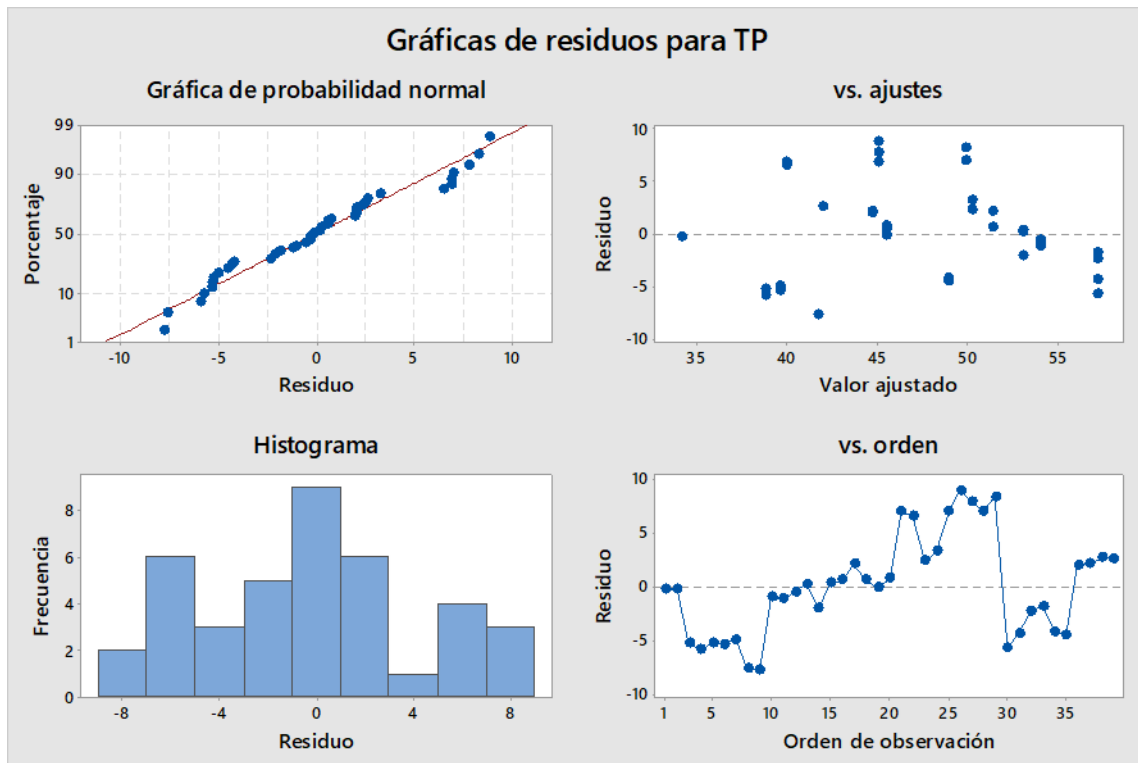


Figura 5. Gráficas de residuos para temperatura del pavimento.

De la figura 5 de probabilidad normal de los residuos para verificar el supuesto de que los residuos están distribuidos normalmente, la gráfica de probabilidad normal de los residuos debe seguir aproximadamente una línea recta, los patrones demostrados con el supuesto de que los residuos están distribuidos normalmente.

En la investigación se empleó la termografía infrarroja para hallar cómo se correlacionan las temperaturas del pavimento flexible en Portoviejo con las condiciones ambientales. Se realizaron mediciones de temperatura en diferentes pavimentos asfálticos de la ciudad y en varios momentos del día, utilizando una cámara termográfica. Estos datos, junto con las temperaturas ambiente y la humedad relativa, fueron utilizados para desarrollar un modelo matemático que relaciona la temperatura del pavimento con la temperatura ambiente.

El estudio concluyó que un modelo lineal es adecuado para explicar las variaciones de temperatura del pavimento, siendo más sencillo de aplicar que un modelo polinómico y sin diferencias significativas en los resultados. Se determinó que la temperatura ambiente influye más en la temperatura del pavimento que la humedad relativa.

El modelo lineal desarrollado permitirá ajustar el diseño de las mezclas asfálticas a las condiciones específicas de Portoviejo, mejorando su desempeño y vida útil, y estableciendo la temperatura crítica de la capa superficial para definir un módulo de rigidez representativo de las condiciones climáticas locales.

La investigación también demostró que la termografía infrarroja es una herramienta efectiva para la evaluación no destructiva de pavimentos flexibles. Además, se subrayó la importancia de considerar la emisividad de la mezcla asfáltica, que puede variar según su composición, textura, agregados, aditivos, y condiciones ambientales. Factores como la contaminación, suciedad, humedad y envejecimiento del pavimento también afectan su capacidad para emitir radiación térmica, lo que resalta la necesidad de incluir una mayor variedad de mezclas asfálticas en futuros estudios para mejorar la precisión del modelo estadístico.

1. Y. P. Caicedo, P.A. Martínez. (2021). "Diseño estructural de pavimento flexible entre la calle 26 y 27 con carrera tercera del barrio Claret en la ciudad de Ibagué". Universidad Cooperativa de Colombia, Posgrado, Ingeniería Civil, Ibagué. pp 14. <https://hdl.handle.net/20.500.12494/34248>
2. Pecara Copa, M. (2019). "Análisis Superficial de una Fisura en Pavimento Flexible con Termografía Infrarroja". *Revistas de la Universidad Privada del Valle*. vol.15 no 47. pp 2-3. <https://revistas.univalle.edu/index.php/ciencias/article/view/304/310>
3. G. Valdés, F. E. Pérez, & A. Martínez. (2012), "Influencia de la temperatura y tipo de mezcla asfáltica en el comportamiento a fatiga de los pavimentos flexibles". *Revista de la Construcción* vol.11 no.1. pp 3-5 https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-915X2012000100009&script=sci_arttext
4. R. J. Pacara M & J. S. Ledezma (2019). Termografía Infrarroja como Alternativa no Destructiva para la evaluación de deterioros en pavimentos flexibles. XV Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción, Chiapas – México, p. 11. DOI: [10.21041/CONPAT2019/V2PAT17](https://doi.org/10.21041/CONPAT2019/V2PAT17)
5. H. D. Benítez, C. Ibarra-Castaneda, A. Bendada, Abdelhakim, X. Maldague, H. Loaiza, E. Caicedo. (2007) "Nuevo contraste térmico para el ensayo termográfico no destructivo de materiales". *Revista Ingeniería y Competitividad*, pp 3-4. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=291323498003>
6. F. I. Pérez de Azpeitia (2016). "La termografía infrarroja: un sorprendente recurso para la enseñanza de la física y la química". *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*. pp 4. <https://rodin.uca.es/handle/10498/18501>
7. Aux, J. H. E., Correa, H. L., & Girón, A. D. R. (2022). El ensayo no destructivo usando termografía infrarroja en el mundo y en América Latina: Una Revisión. *Scientia et Technica*, 27(1), 15-27.
8. Copa, M. P. (2019). Análisis Superficial de una Fisura en Pavimento Flexible con Termografía Infrarroja. *Journal Boliviano de Ciencias*, 15(47), 25-32.
9. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures." AASHTO, 1993. <https://www.academia.edu/8963834>
10. F. Leiva Villacorta. (2004). Módulo dinámico de mezclas asfálticas. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (UCR). pp 2-3. <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/1449>
11. J. H. A. Rocha, y. V. Póvoas (2017), "La termografía infrarroja como un ensayo no destructivo para la inspección de puentes de concreto armado: Revisión del estado del arte", *Revista ALCONPAT*, pp. 4, DOI: <https://www.scielo.org.mx/pdf/alconpat/v7n3/2007-6835-alconpat-7-03-200.pdf>
12. del Angel, C. N. E., & Díaz, A. F. (2021). *Termografía infrarroja pasiva aplicada a sistemas de detección de fallas: Una revisión*. *Digital Ciencia@ UAQRO*, 14(2), 28-40.
13. Barreira, E., Almeida, R. M., & Simões, M. L. (2021). Emissivity of building materials for infrared measurements. *Sensors*, 21(6), 1961.

Conflictos de intereses:

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Declaración de autoría:

Kelvin José Franco Mera: Investigación e idea, recolección, interpretación y análisis de los datos, traducción, redacción del manuscrito y aprobación en su versión final, elaboración del resumen y traducción al inglés, elaboración de las conclusiones, adecuaciones a las normas de la revista y envío.