

Evaluación experimental del gradiente térmico vertical de una viga-losa I compuesta de
concreto reforzado bajo las condiciones climáticas de Bucaramanga

Pedro Juan Cavadia Ibañez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Maestría en Ingeniería Civil

Director

José Miguel Benjumea Royero

PhD. en Ingeniería Civil y Ambiental

Codirectores

Oscar Javier Begambre Carrillo

Edison Osorio Bustamante

PhD. En Ingeniería Civil

PhD. en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A mi madre, pilar incondicional de mi vida; fuente de mi mayor fortaleza y, a la vez, el origen de mi más profunda vulnerabilidad. Tu amor inquebrantable ha sido el cimiento de cada uno de mis logros.

Agradecimientos

Al culminar esta etapa académica, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible este logro.

En primer lugar, quiero agradecer al Profesor José M. Benjumea, director de esta tesis, por su valiosa orientación, dedicación y apoyo constante durante todo el proceso de investigación. Sus conocimientos y rigurosidad académica han sido fundamentales para el desarrollo y culminación de este trabajo. A los Profesores Oscar Begambre y Edison Osorio, codirectores de esta investigación, por sus acertadas observaciones, su tiempo y su disposición para compartir sus experiencias y conocimientos. Sus contribuciones enriquecieron significativamente el contenido y la calidad de esta tesis.

Mi gratitud infinita a mi madre Sol Ibañez, quien ha sido mi apoyo incondicional en cada etapa de mi vida académica y personal. Su amor, paciencia y sacrificio han sido el motor que me impulsa a seguir adelante y a superar cada obstáculo. Este logro es también suyo. A mi hermano mayor Randy Sierra, por sus valiosas contribuciones, consejos y apoyo técnico durante la realización de este trabajo. Su ayuda y perspectiva fueron cruciales en momentos decisivos de esta investigación.

A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, por el apoyo económico brindado, que hizo posible la realización de este proyecto de investigación. Su compromiso con el desarrollo académico y científico es un pilar fundamental para el avance del conocimiento. A todos los compañeros, técnicos, personal administrativo y demás personas que, de una u otra forma, contribuyeron con sus conocimientos, tiempo y apoyo para que este trabajo llegara a buen término.

Finalmente, a la Universidad Industrial de Santander, por ser el espacio de formación y crecimiento donde he podido desarrollar mis capacidades y habilidades como investigador. A todos, mi más profundo agradecimiento.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	21
1. Antecedentes y fundamentación teórica.....	23
1.1. Antecedentes sobre el estudio y determinación experimental del gradiente térmico vertical en secciones de puentes de concreto reforzado	23
1.2. Mecanismos de transmisión de calor en puentes de concreto.	26
1.3. Propiedades y comportamiento térmico del concreto	29
1.4. Ecuación diferencial de gobierno para el fenómeno de transferencia de calor en puentes de concreto.	33
1.5. Sistemas de medición de temperatura	34
1.6. Factores meteorológicos de Bucaramanga que influyen en las variaciones térmicas del experimento	36
Angulo de incidencia de los rayos solares en Bucaramanga.....	37
1.7. Correlación con coeficiente de Spearman.....	40
2. OBJETIVOS.....	41
2.1. Objetivo general.	41
2.2. Objetivos específicos.....	41
3. Metodología	42
3.1. Campaña experimental	42
3.1.1. Medición de temperatura interna, externa y monitoreo de las variables meteorológicas.	42

Variables meteorológicas de la zona de estudio.....	56
Medición de la temperatura externa con el sistema de monitoreo térmico sin contacto.....	59
Medición de la temperatura interna con el sistema de monitoreo térmico de contacto.	65
3.2. Determinación del gradiente vertical externo y la temperatura mínima externa.	66
3.3. Determinación del gradiente vertical interno y la temperatura mínima interna.....	68
3.4. Determinación de las correlaciones.....	70
4. RESULTADOS.....	74
4.1. Variables meteorológicas.....	74
4.1.1. Normalidad de las variables meteorológicas.....	79
4.2. Temperatura superficial en la viga-losa.	79
4.2.1. Perfiles verticales de temperatura superficial.....	80
4.2.2. Perfiles verticales de temperatura superficial por franjas horarias.	87
4.2.3. Tendencia horaria de la temperatura superficial	90
4.2.4. Series de tiempo diarias de la temperatura superficial.....	92
4.3. Temperatura interna en la viga-losa.....	98
4.4. Temperaturas mínimas y uniformes.....	114
4.5. Comportamiento térmico en días característicos.	118
4.6. Gradientes térmicos verticales.	130
4.7. Correlación de datos.....	141
5. Conclusiones	155
Referencias Bibliográficas	162
Apéndices	170

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Franjas horarias	64
Tabla 2 Resumen estadístico de los datos de temperatura ambiente.....	75
Tabla 3 Resumen estadístico de los datos de radiación solar.....	76
Tabla 4 Resumen estadístico de los datos de precipitación.	77
Tabla 5 Resumen estadístico de los datos de precipitación.	78
Tabla 6 Variación de la dirección del viento.....	79
Tabla 7 Resultado del test de Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov).	79
Tabla 8 Resumen estadístico de los datos de temperatura superficial (valores en °C).	85
Tabla 9 Resultado del test de Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) para temperaturas superficiales del VANT y cámara portátil.....	86
Tabla 10 Tendencia general y valores máximos, mínimos y promedio de la temperatura superficial de la viga-losa.....	91
Tabla 11 Resumen estadístico de los datos de temperatura interna (valores en °C).	101
Tabla 12 Resultado del test de Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) para temperatura interna.	102
Tabla 13 Tendencia general promedio de la temperatura interna.	105
Tabla 14 Profundidad y conteo de temperatura internas mínimas horarias.	114
Tabla 15 Extracto del registro de temperatura mínimas en diferentes instantes de medición.	116
Tabla 16 Profundidad y porcentaje de ocurrencia de temperatura externa mínimas horarias.	117
Tabla 17 Nomenclatura de días característicos y evento específico principal.	118
Tabla 18 Valores de ΔT (°C) por cada punto de medición para las franjas 1 y 2.	133

Tabla 19 Valores de ΔT por cada punto de medición para las franjas 3 y 4.	135
Tabla 20 Valores de ΔT ($^{\circ}\text{C}$) por cada punto de medición para las franjas 1 y 2.	138
Tabla 21 Valores de ΔT ($^{\circ}\text{C}$) por cada punto de medición para las franjas 3 y 4.	140
Tabla 22 Correlación de magnitudes de ΔT interno y externo.	142
Tabla 23 Correlación de perfiles verticales de temperatura externa e interna.	144
Tabla 24 Comparación de los resultados de las correlaciones.	145
Tabla 25 Valores de correlación de perfiles verticales de temperatura externa e interna.	147
Tabla 26 Valores de correlación de los perfiles verticales de temperatura interna y las variables meteorológicas.	148
Tabla 27 Resumen de la correlación entre los perfiles verticales de temperatura interna y las variables meteorológicas.	149
Tabla 28 Correlación de los perfiles verticales de temperatura interna y variables meteorológicas – franja horaria 1.	151
Tabla 29 Correlación de los perfiles verticales de temperatura interna y variables meteorológicas – franja 2.	152
Tabla 30 Correlación de los perfiles verticales de temperatura interna y variables meteorológicas – franja 3.	153
Tabla 31 Correlación de los perfiles verticales de temperatura interna y variables meteorológicas – franja 4.	154

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Mapa de co-ocurrencia de la literatura analizada	24
Figura 2 Mecanismos de transferencia de calor. Fuente: Hagedorn et al. (2019).....	27
Figura 3 Transferencia de calor por radiación en puentes de concreto. Fuente: Mirambell (1987)	28
Figura 4 (a) Gradiente positivo de temperatura vertical en superestructuras de concreto y acero, (b) zonas y valores de temperaturas en los gradientes. Fuente: AIS (2014).....	31
Figura 5 Representación esquemática de los componentes constituyentes de un perfil de temperatura. Fuente: EN 1991-1-5 (2003).	32
Figura 6 Termopar con junta de soldadura sin bulbo de recubrimiento. Fuente: Rul (2019).	35
Figura 7 Esquema de funcionamiento de la cámara termográfica. Fuente: Flickr (2012).	36
Figura 8 Carta solar para dos fechas en el sitio del experimento. Adaptado de SunEarthTools.com (2024)	39
Figura 9 Terraza Nororiental del Edificio Álvaro Beltrán Pinzón de la UIS	43
Figura 10 Vista a la terraza desde el mezanine del lab. de estructuras del ABP.....	43
Figura 11 Equipos utilizados.....	44
Figura 12 Dimensiones de vigas AASHTO consideradas. Fuente: AASHTO (2012).....	47
Figura 13 Plano estructural segundo piso del edificio y modelo computacional con cargas aplicadas. Fuente: Ariza (2024)	48
Figura 14 Refuerzo y dimensiones del modelo viga-losa. Fuente: Ariza (2024).....	49
Figura 15 Esquema del modelo viga-losa con soporte metálico. Fuente: Ariza (2024)	49

Figura 16 Terraza cubierta con polisombra verde.....50

Figura 17 Colocación del refuerzo de la viga-losa y ensamble de formaleta51

Figura 18 Ubicación de termopares en la sección central del elemento52

Figura 19 Colocación de los termopares sujetos al refuerzo de acero52

Figura 20 Penúltima capa de concreto con termopares visibles y viga-losa fundida.....53

Figura 21 Condición de la viga-losa durante curado.....54

Figura 22 Tiempo de correcto funcionamiento de los equipos.55

Figura 23 Estación meteorológica instalada en la terraza.57

Figura 24 Rosa de los vientos. Fuente: (Pngwing, 2020).....59

Figura 25 Esquema con sobrevuelo del VANT a la viga-losa.60

Figura 26 Fotografías de espectro visible con puntos de medición señalados en las caras de interés.
.....61

Figura 27 Fotografías térmicas del VANT con temperatura medida en los puntos de medición. .61

Figura 28 Posicionamiento de las cámaras portátiles.....62

Figura 29 Imágenes térmicas tomadas por las cámaras portátiles (a) E6 y (b) C562

Figura 30 Ubicación de los termopares analizados en este trabajo.....65

Figura 31 Variación térmica 11/09/2023- 9:30: (a) Perfil vertical de temperatura y (b) GVT.....68

Figura 32 Variación térmica 23/09/2023 – 13:30: (a) Perfil vertical de temperatura y (b) GVT. 69

Figura 33 Temperatura ambiente máxima, mínima y su diferencia durante el periodo de medición.
.....75

Figura 34 Radiación solar máxima, mínima y su diferencia durante el periodo de medición.76

Figura 35 Precipitación promedio diaria durante el periodo de medición.77

Figura 36 Velocidad promedio diaria del viento.....	78
Figura 37 Perfiles verticales de temperatura superficial obtenidos con el VANT – 06/10/2023...	81
Figura 38 Perfiles verticales de temperatura superficial obtenidos con cámara portátil – 06/10/2023.	81
Figura 39 Distribución de la frecuencia de las diferencias de temperatura entre el VANT y cámara portátil.	83
Figura 40 Perfiles verticales de temperatura superficial obtenidos del (a) VANT y (b) Cámara portátil.	84
Figura 41 Perfiles verticales de temperatura – VANT (a) franja 1, (b) franja 2, (c) franja 3 y (d) franja 4.....	89
Figura 42 Perfiles verticales de temperatura – cámara portátil (a) franja 1, (b) franja 2, (c) franja 3 y (d) franja 4.....	90
Figura 43 Variación en el tiempo de la temperatura ambiente durante el periodo de medición....	92
Figura 44 Series de tiempo promedio horario de (a) radiación solar, (b) temperatura ambiente, (c) temperatura superficial – VANT y (d) temperatura superficial – cámara portátil.....	93
Figura 45 Series de tiempo punto P1 con (a) VANT y (b) cámara portátil.	94
Figura 46 Series de tiempo punto P2 con (a) VANT y (b) cámara portátil.	94
Figura 47 Series de tiempo punto P3 con (a) VANT y (b) cámara portátil.	94
Figura 48 Series de tiempo punto P4 con (a) VANT y (b) cámara portátil.	95
Figura 49 Series de tiempo punto P5 con (a) VANT y (b) cámara portátil.	95
Figura 50 Series de tiempo punto P6 con (a) VANT y (b) cámara portátil.	96
Figura 51 Series de tiempo punto P7 con (a) VANT y (b) cámara portátil.	97

Figura 52 Series de tiempo punto P8 con (a) VANT y (b) cámara portátil.	97
Figura 53 Series de tiempo punto P9 con (a) VANT y (b) cámara portátil.	97
Figura 54 Series de tiempo punto P10 con (a) VANT y (b) cámara portátil.	98
Figura 55 Perfiles verticales de temperatura interna - 06/10/2023.	99
Figura 56 Perfiles verticales de temperatura interna.	100
Figura 57 Perfiles verticales de temperatura interna para (a) franja 1, (b) franja 2, (c) franja 3 y (d) franja 4.....	104
Figura 58 Tendencia típica de la radiación solar durante la medición y series de tiempo de la temperatura interna para 09/09/2023.....	106
Figura 59 Series de tiempo promedio horario de (a) radiación solar, (b) temperatura ambiente y (c) temperatura interna.....	107
Figura 60 Series de tiempo de temperatura interna en el punto P1.....	108
Figura 61 Series de tiempo de temperatura interna de los puntos (a) P2, (b)P3 y (c) P4.	109
Figura 62 Series de tiempo de temperatura interna de los puntos (a) P5, (b)P6 y (c) P7.	110
Figura 63 Series de tiempo de temperatura interna en el punto P9.....	111
Figura 64 Series de tiempo de temperatura interna en el punto P9.....	112
Figura 65 Promedios de las series de tiempo de temperaturas internas en cada punto de medición.	113
Figura 66 Porcentajes de ocurrencia por hora de la temperatura interna mínima en (a) P1 y (b) P6.	115
Figura 67 Velocidad del viento del 22/09/2023.....	119

Figura 68 Perfiles térmicos verticales del día DS1: (a) temperatura interna y (b) temperatura externa – VANT.....	119
Figura 69 Series de tiempo de la temperatura interna del día DS1.	120
Figura 70 Velocidad de enfriamiento promedio en puntos internos y externos de la viga-losa – DS1	121
Figura 71 Temperatura ambiente (izquierda) y radiación solar (derecha) para el día DS2.	122
Figura 72 Perfiles térmicos verticales del día DS2: (a)temperatura interna y (b) temperatura externa.	122
Figura 73 Velocidad del viento para el día DS2.	123
Figura 74 Series de tiempo de la temperatura para el día DS2: (a) interna y (b) externa	125
Figura 75 Temperatura ambiente (izquierda) y radiación solar (derecha) para el día DS3.	126
Figura 76 Series de tiempo de la temperatura para el día DS3: (a) interna y (b) externa.	127
Figura 77 Respuesta en el tiempo para el día DS4 de la (a) radiación solar, (b) temperatura ambiente y (c) precipitación.....	128
Figura 78 Respuestas observadas de las series de tiempo de puntos (a) internos y (b) externos – DS4.....	129
Figura 79 Variación térmica externa 11/09/2023: (a) perfiles verticales de temperatura y (b) GVT.	131
Figura 80 Gradientes térmicos verticales externos para:(a) franja 1 y (b) franja 2.....	133
Figura 81 Gradientes térmicos verticales externos agrupados:(a) franja 3 y (b) franja 4.	134
Figura 82 Variación térmica interna 23/09/2023: (a) perfiles verticales de temperatura y (b) GVT.	136

Figura 83 Gradientes térmicos verticales internos agrupados en (a) franja 1 y (b) franja 2.137

Figura 84 Gradientes térmicos verticales internos agrupados en (a) franja 3 y (b) franja 4.140

Figura 85 Gradiente térmico vertical recomendado para viga AASHTO Tipo II y Tipo IV.
Adaptado al español de Hagedorn et al. (2019).141

Glosario

Cambio climático: variación del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera y que se suma a la variabilidad natural del clima.

Concreto reforzado: material compuesto que combina concreto y acero, donde el acero proporciona resistencia a la tracción y el concreto a la compresión.

Esfuerzos térmicos: tensiones internas generadas en un material o estructura debido a cambios de temperatura y restricciones a la expansión o contracción.

Gradiente térmico: variación de temperatura a través de un medio, expresada como la tasa de cambio de temperatura con respecto a la distancia en una dirección específica.

Gradiente térmico vertical: variación de temperatura a lo largo de la altura o profundidad de una estructura.

Infraestructura resiliente: estructuras y sistemas diseñados para resistir, absorber y recuperarse rápidamente de los impactos de eventos extremos, incluidos los relacionados con el clima.

Monitoreo híbrido: sistema de vigilancia que combina diferentes tecnologías o métodos de medición para obtener datos más completos y precisos.

Perfil de temperatura: representación gráfica de la distribución de temperaturas a lo largo de una dimensión específica de un objeto o estructura.

Puente viga-losa: estructura compuesta por vigas longitudinales que soportan una losa superior, comúnmente utilizada en puentes de concreto.

Sistema de monitoreo de temperatura: conjunto de dispositivos y métodos utilizados para medir y registrar temperaturas en puntos específicos de una estructura a lo largo del tiempo.

Superestructura de puente: componente del puente que descansa sobre los apoyos o estribos y soporta directamente la carga de tráfico.

Termopares tipo T: sensores de temperatura que utilizan dos metales diferentes (cobre y plomo) para medir temperaturas basándose en el efecto termoeléctrico.

Variación diurna: cambio en las condiciones ambientales (como temperatura) que ocurre durante un ciclo de 24 horas.

Vano soportado: sección de un puente que se extiende entre dos apoyos consecutivos.

Resumen

Título: Evaluación experimental del gradiente térmico vertical de una viga-losa I compuesta de concreto reforzado bajo las condiciones climáticas de Bucaramanga *

Autor: Pedro Juan Cavadía Ibañez**

Palabras Clave: Gradiente térmico vertical, puente viga-losa, concreto reforzado, monitoreo híbrido de temperatura, condiciones meteorológicas tropicales, termopares, cámaras térmicas.

Descripción: Esta investigación evalúa el comportamiento del gradiente térmico vertical en un segmento de puente viga-losa de concreto reforzado a escala real bajo las condiciones meteorológicas de Bucaramanga. El cambio climático y sus variaciones de temperatura impactan significativamente la infraestructura, con olas de calor que se espera se intensifiquen en la segunda mitad del siglo XXI, creando desafíos críticos para el diseño y mantenimiento ingenieril. Las fluctuaciones diarias y estacionales de temperatura causan expansión y contracción longitudinal en las superestructuras de puentes, generando gradientes térmicos que inducen tensiones en los vanos soportados. El estudio implementa un enfoque experimental utilizando un sistema híbrido de monitoreo de temperatura en un segmento de concreto de 1,2 m. Mediante una exhaustiva revisión bibliográfica de más de 100 artículos relevantes y el despliegue de tecnología avanzada (termopares tipo T y cámaras térmicas), esta investigación contribuye a la comprensión de cómo factores

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenieras Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Maestría en ingeniería civil. Director: José M. Benjumea. Ph.D. en Ingeniería Civil y Ambiental. Codirectores: Oscar Begambre y Edison Osorio. Ph.D. en Ingeniería Civil – Estructuras.

climáticos específicos —incluyendo días soleados, lluvias repentinas y el comportamiento del viento afectan la distribución térmica dentro de la estructura. Se recolectaron mediciones continuas de temperatura en puntos estratégicos internos y externos del segmento viga-losa durante 52 días. Los datos resultantes permitieron determinar los perfiles de temperatura vertical y los gradientes térmicos, además de identificar patrones clave de variación térmica. A diferencia de estudios existentes realizados en países como China, Nueva Zelanda y Estados Unidos, esta investigación aborda la brecha específica de conocimiento sobre el comportamiento del gradiente térmico bajo las condiciones climáticas colombianas. Los hallazgos proporcionan información valiosa para ingenieros que diseñan infraestructura resiliente en regiones tropicales, particularmente para estructuras de concreto vulnerables a variaciones térmicas significativas que afectan su integridad y durabilidad.

Abstract

Title: Experimental evaluation of the vertical thermal gradient of a slab-I beam composed of reinforced concrete under the climatic conditions of Bucaramanga*

Author(s): Pedro Juan Cavadia Ibañez¹

Key Words: Vertical thermal gradient, beam-to-slab bridge, reinforced concrete, hybrid temperature monitoring, tropical weather conditions, thermocouples, thermal cameras.

Description: This research evaluates the vertical thermal gradient behavior in a full-scale reinforced concrete beam-slab bridge segment under Bucaramanga's meteorological conditions. Climate change and its temperature variations significantly impact infrastructure, with heat waves expected to intensify in the second half of the 21st century, creating critical challenges for engineering design and maintenance. Daily and seasonal temperature fluctuations cause longitudinal expansion and contraction in bridge superstructures, generating temperature gradients that induce stresses across supported spans. The study implements an experimental approach using a hybrid temperature monitoring system on a 1.2 m concrete segment. Through extensive literature review of over 100 relevant articles and advanced technology deployment (Type T thermocouples and thermal cameras), this research contributes to understanding how specific climate factors—including sunny days, sudden rainfall, and wind behavior—affect thermal distribution within the structure. Continuous temperature measurements were collected at strategic internal and external

* Degree Work

¹Faculty of Physical and Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Master's degree in civil engineering. Director: José M. Benjumea. Ph.D. in Civil and Environmental Engineering. Co-directors: Oscar Begambre and Edison Osorio. Ph.D. in Civil Engineering – Structures.

points of the beam-slab segment over 52 days. The resulting data enabled determination of vertical temperature profiles and thermal gradients while identifying key thermal variation patterns. Unlike existing studies conducted in countries like China, New Zealand, and the United States, this research addresses the specific gap in knowledge regarding thermal gradient behavior under Colombian climatic conditions. The findings provide valuable insights for engineers designing resilient infrastructure in tropical regions, particularly for concrete structures vulnerable to significant thermal variations that affect their integrity and durability.

Introducción

El cambio climático, con sus variaciones de temperatura, afecta significativamente la infraestructura, lo que preocupa a los ingenieros actuales y futuros. Se espera que las olas de calor sean más intensas y frecuentes en la segunda mitad del siglo XXI (USAID, 2015). Por ello, es crucial que los ingenieros diseñen y mantengan infraestructuras resilientes y eficientes, considerando los desafíos del cambio climático y asegurando la seguridad y el bienestar de las comunidades.

La variación diurna y estacional de la temperatura del aire y la luz solar afecta a la superestructura de un puente causando expansión y contracción longitudinal, o también creando diferencias de temperatura a lo largo de la profundidad y el ancho de la estructura. Estas variaciones generan gradientes de temperatura que provocan tensiones en los vanos soportados (Hoffman et al., 1983). La evaluación de gradientes térmicos en estructuras de concreto es cada vez más importante, especialmente en zonas tropicales. Las estructuras como los puentes de concreto reforzado son vulnerables a variaciones térmicas significativas, afectando su integridad y durabilidad. Aunque hay estudios sobre los efectos del gradiente térmico en países como China (Sheng et al., 2022; Song et al., 2012; Wang et al., 2016), Nueva Zelanda (Priestley, 1972), Estados Unidos (Abid & Özakça, 2020; Mussa et al., 2020; Tayşi & Abid, 2015), falta investigación específica considerando las condiciones climáticas de Colombia y sus ciudades principales.

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente estudio evalúa el comportamiento del gradiente térmico vertical en un segmento de un puente de viga-losa de concreto reforzado a escala real, con una longitud de 1.2 m y bajo las condiciones meteorológicas de Bucaramanga, utilizando un enfoque experimental con un sistema de monitoreo híbrido de temperatura. A través de la revisión

de más de 100 artículos relevantes y la implementación de tecnología avanzada, como termopares tipo T y cámaras térmicas, se contribuye al entendimiento de cómo factores climáticos específicos, como días soleados, lluvias repentinas y el comportamiento del viento, afectan la distribución térmica en esta estructura.

Con el sistema híbrido se midió de forma continua de la temperatura en puntos estratégicos del segmento viga-losa, tanto interna como externamente, durante un período de 52 días. Los resultados obtenidos permitieron determinar los perfiles de temperatura vertical y los gradientes térmicos, además de identificar patrones clave de variación térmica, proporcionando una comprensión detallada del comportamiento del gradiente térmico.

Este documento se estructura en cinco capítulos: el capítulo 1 presenta una introducción y revisión de la literatura; el capítulo 2 describe los objetivos de investigación; el capítulo 3 expone la metodología experimental desarrollada y; el capítulo 4 se discute el análisis de los resultados de la investigación. Por último, en el capítulo 5 se presentan las principales conclusiones y se establecen recomendaciones para futuras investigaciones.

1. Antecedentes y fundamentación teórica

1.1. Antecedentes sobre el estudio y determinación experimental del gradiente térmico vertical en secciones de puentes de concreto reforzado

Para desarrollar la revisión de antecedentes, considerando el enfoque experimental y la implementación de un sistema de monitoreo híbrido de la temperatura enfocado en puentes, se llevaron a cabo los siguientes pasos metodológicos:

a. Se definieron los objetivos de la revisión y el alcance temático, abarcando estudios sobre la evaluación del gradiente térmico vertical en estructuras de concreto, con un enfoque particular en las secciones tipo viga-losas de puentes. Además, se incluyeron investigaciones sobre la patología del concreto reforzado y los efectos de las variaciones de temperatura.

b. Se realizaron búsquedas en las bases de datos de Google Scholar, IEEE Xplore, Web of Science y Scopus. Los términos de búsqueda utilizados incluyeron combinaciones de palabras clave como "gradiente térmico vertical", "temperatura interna", "viga-losas de concreto", "puentes", "clima tropical", "Bucaramanga", "radiación solar", "velocidad del viento" y "precipitación". Utilizando la base de datos Scopus, se empleó la herramienta VOSviewer[®] para determinar asociaciones relevantes de la literatura existente sobre gradientes térmicos (Figura 1). Esta figura es una visualización de red de un análisis de coocurrencia, técnica que identifica temas o conceptos relacionados en un conjunto de datos de texto, específicamente entre artículos científicos e informes. Cada círculo representa una palabra o frase, cuyo tamaño indica la frecuencia de aparición en el conjunto de datos. Las líneas entre los círculos muestran la fuerza de la relación entre las palabras o frases; cuanto más gruesa es la línea, más a menudo aparecen juntas.

- Clúster Verde: "vertical temperature gradients," "composite beams and girders," "steel bridges," "monitoring". Este grupo se relaciona con la medición y monitoreo de gradientes térmicos verticales en estructuras de puentes, incluyendo puentes de secciones mixtas.
- Clúster Amarillo: "bridge design," "highway bridges," "thermal stress," "temperature loads". Este clúster está enfocado en el diseño de puentes y cómo las cargas y el estrés térmico afectan a estas estructuras.
- Clúster Morado: "temperature field," "temperature differences," "slab tracks". Este clúster trata sobre las diferencias de temperatura en las estructuras y cómo estas diferencias se distribuyen.

La Figura 1 brinda una imagen amplia de los diferentes aspectos de los gradientes térmicos interconectados en la investigación sobre estructuras como puentes. Los términos más grandes y los enlaces más gruesos indican áreas de mayor enfoque e interrelación en la literatura científica. Esta visualización es útil para identificar áreas clave de investigación y su interrelación, facilitando una comprensión integral de los estudios sobre gradientes térmicos en estas estructuras.

c. Posteriormente, se seleccionaron artículos científicos publicados en los últimos diez años para asegurar la relevancia y actualidad de la información. No obstante, también se incluyeron publicaciones más antiguas que contienen información relevante y pionera en la temática. Se priorizaron estudios empíricos, experimentales y revisiones sistemáticas con datos cuantitativos, metodologías aplicables a este estudio, análisis meteorológicos y monitoreo de temperaturas en puentes de sección viga-losa.

Esta metodología permitió una revisión crítica y exhaustiva del conocimiento existente, proporcionando una base sólida para el desarrollo del proyecto de investigación. Se consideraron más de 100 artículos relevantes, los cuales son citados a lo largo del documento. La revisión de la literatura no solo estableció la fundamentación teórica del estudio, sino que también contribuyó a la elaboración de la metodología, el diseño del proceso experimental y el análisis de los resultados. En lugar de evaluar el estado del arte a partir de la revisión bibliográfica, el objetivo fue el de fundamentar el desarrollo del proyecto, enfatizando los aspectos experimentales y estadísticos necesarios para la investigación. Esto aseguró una base teórica robusta y una aplicación práctica adecuada. .

1.2. Mecanismos de transmisión de calor en puentes de concreto.

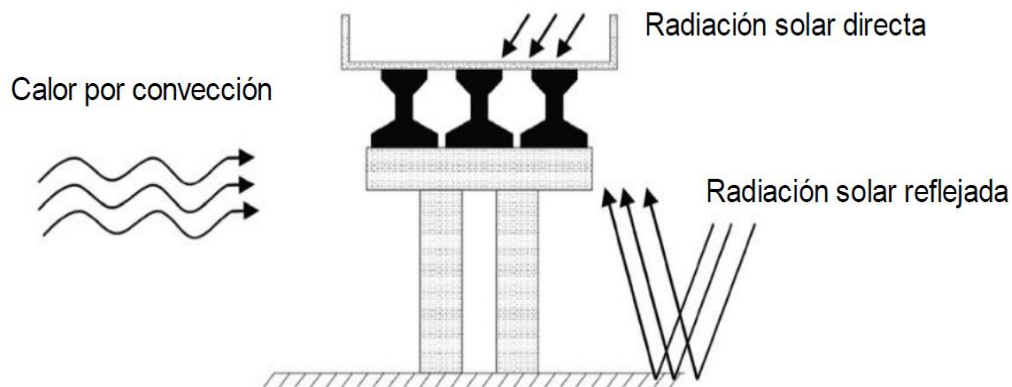
El concreto es un material compuesto conocido por su baja conductividad térmica, pero tiene la capacidad de retener parcialmente la energía térmica durante varias horas. Esta característica implica que, al exponerse a una fuente de calor, el concreto aumentará su temperatura de manera gradual (Lee et al. , 2021). Un ejemplo de este tipo de fuente de calor es la radiación solar natural, la cual varía a lo largo del día. La radiación solar aumenta rápidamente después del amanecer, alcanzando su máximo alrededor del mediodía, y luego disminuye rápidamente hasta llegar a cero tras la puesta del sol. Durante la noche y las primeras horas de la mañana antes del amanecer, la radiación solar es nula.

Para estructuras como los puentes, la radiación solar resulta en una carga de diseño efectiva debido a la exposición constante a condiciones exteriores, que incluyen variaciones en la temperatura del aire, la velocidad del viento y la radiación solar. La Figura 2 ilustra los principales mecanismos de transferencia de calor en estructuras de concreto: la absorción de la radiación solar

directa o reflejada y la convección del aire del entorno natural. En la superestructura expuesta a la radiación, la distribución de temperatura a través de su sección transversal, influenciada por su geometría, se produce de manera no lineal, lo que se conoce como gradiente térmico vertical (Abid et al. , 2021). Si este calentamiento debido a la radiación solar afecta la superficie lateral de la superestructura, puede causar una inclinación y desestabilización debido a efectos de excentricidades (Abid & Özakça, 2020; Hagedorn et al., 2019).

Figura 2

Mecanismos de transferencia de calor. Fuente: Hagedorn et al. (2019)



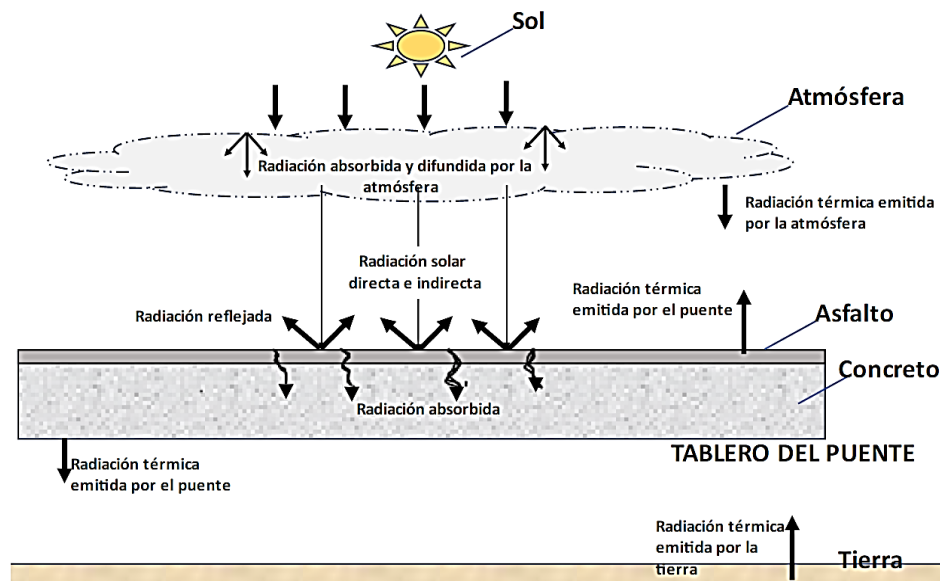
Durante las horas diurnas, los puentes de concreto experimentan una ganancia neta de calor debido a la radiación solar directa e indirecta. Este calor se acumula en la estructura, elevando su temperatura de manera gradual. Por la noche, la energía térmica almacenada se libera mediante re-radiación hacia el entorno, ayudando a equilibrar la temperatura del puente con la del ambiente circundante (IDEAM, 2012). La Figura 3 ilustra la transferencia de calor por radiación en un puente de concreto, mostrando cómo las diferentes formas de radiación impactan en la superestructura. La estructura recibe radiación directa del sol, así como radiación reflejada por el entorno, lo que contribuye a un calentamiento desigual a lo largo de su superficie. Además, la Figura 3 destaca la

emisión de radiación térmica tanto por el puente como por el suelo, lo que es crucial para entender el comportamiento térmico del puente y diseñar estrategias de mitigación adecuadas.

Para resolver el problema de la transferencia de temperatura en puentes de concreto, es esencial conocer la radiación solar absorbida y el intercambio de energía térmica entre el entorno y el puente, considerando que ambos emiten radiación. Aunque la radiación solar incidente puede medirse experimentalmente, existen metodologías analíticas que permiten obtener valores con alta precisión (Tayşi & Abid, 2015).

Figura 3

Transferencia de calor por radiación en puentes de concreto. Fuente: Mirambell (1987)



La transferencia de calor por convección ocurre debido al movimiento del fluido que rodea el elemento de concreto, y esta variación de temperatura depende de variables como la velocidad y dirección del viento, así como la rugosidad superficial (Mirambell, 1987) Durante las horas nocturnas, se produce enfriamiento por convección, donde la superficie externa del puente está caliente y el aire circundante es más frío (Abid et al. , 2020).

Además de la radiación y la convección, la transferencia de calor también se da por conducción. Sin embargo, este mecanismo transfiere una cantidad pequeña de calor y difícil de medir (Potgieter & Gamble, 1989). Por esta razón, la transferencia de temperatura por conducción y convección suele evaluarse de forma conjunta, asumiendo un coeficiente térmico combinado en los cálculos de la ecuación diferencial de gobierno (sección 1.4.) Este coeficiente depende de variables que afectan la convección, como la velocidad del viento, la temperatura ambiente y la temperatura superficial del elemento de concreto (Mirambell, 1987).

1.3. Propiedades y comportamiento térmico del concreto

Debido a la acción de la temperatura, los puentes de concreto experimentan dos efectos superpuestos. El primero es un cambio de temperatura uniforme en toda la superestructura, lo que puede provocar una variación en la longitud total del puente o, si hay restricciones en los apoyos, la aparición de esfuerzos internos. El segundo efecto es una distribución térmica desigual en la sección transversal, conocido como gradiente térmico vertical. Este fenómeno ocurre cuando la radiación solar calienta la superficie o cubierta del puente, mientras que la parte inferior permanece a una temperatura diferente y generalmente más baja (Johnson, 2005).

Durante un período de tiempo, el calentamiento y enfriamiento de la superficie superior de una losa de puente resultará en un calentamiento máximo (superficie superior más caliente) y una variación máxima de enfriamiento (superficie inferior más caliente). La diferencia de temperatura vertical puede producir efectos dentro de una estructura debido a la restricción de la curvatura libre, la fricción en los apoyos rotacionales y los efectos geométricos no lineales. En el caso de la construcción en voladizo, puede ser necesario tener en cuenta una diferencia de temperatura inicial en el cierre del voladizo. Además, el efecto de las diferencias de temperatura verticales debe

considerarse incluyendo un componente de diferencia de temperatura no lineal (EN 1991-1-5, 2003).

Los diferenciales verticales de temperatura, calculados a partir de las mayores diferencias de temperatura entre las temperaturas más altas y las más bajas a lo largo de la profundidad de las secciones, son máximos en verano y mínimos en invierno en países con estaciones marcadas. Las secciones más profundas tienden a exhibir diferenciales de temperatura vertical más altos. Basándose en estos diferenciales, se obtienen gradientes de temperatura verticales estacionales restando la temperatura más baja a lo largo de la profundidad de las secciones. Estos gradientes son máximos en verano debido a la mayor intensidad de radiación solar en la superficie superior de la viga-losa. Con los cambios estacionales, los gradientes verticales de temperatura disminuyen en invierno y son similares en otoño y primavera (Lee, 2012).

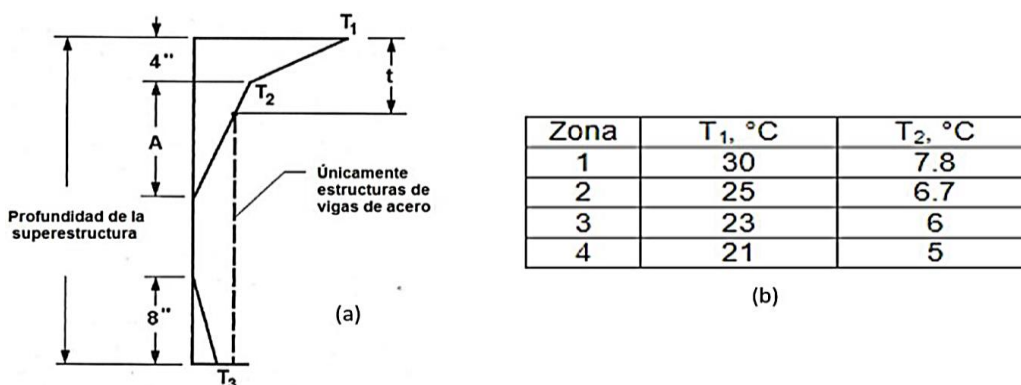
El gradiente térmico vertical en el concreto representa este cambio de temperatura no lineal en la sección, el cual puede ser positivo cuando la temperatura de la placa superior del puente es mayor que la de la parte inferior. Esto ocurre en días con alta radiación solar, cielo despejado, amplias variaciones de temperatura ambiente y vientos ligeros. Por otro lado, el gradiente térmico vertical será negativo cuando la superficie superior es más fría que la inferior del puente, lo cual generalmente se desarrolla en noches invernales atípicas (Imbsen & Vandershaf, 1985). El Código Colombiano de Puentes (en adelante CCP-14), en su sección 3.12.3, define el gradiente de temperatura positivo (Figura 4a) e indica que los valores de T1, T2 y T3 deben tomarse según la tabla 3.12.3-1 (Figura 4b). Para obtener el gradiente térmico negativo, estos valores deben multiplicarse por -0.3 para tableros de concreto descubiertos y por -0.2 para los recubiertos con asfalto (AIS, 2014). Cabe destacar que estos valores fueron adaptados de las especificaciones de

diseño para puentes en Estados Unidos y que las zonas 1 a 4, mencionadas en esas especificaciones, no están delimitadas específicamente para Colombia.

Figura 4

(a) Gradiente positivo de temperatura vertical en superestructuras de concreto y acero,

(b) zonas y valores de temperaturas en los gradientes. Fuente: AIS (2014).



Por otro lado, considerando que el concreto es un material compuesto dosificado, conformado por agua, áridos, cemento, y en algunos casos conglomerante hidráulico y aditivos, estos constituyentes influyen en las características térmicas y, por ende, en el comportamiento térmico del concreto. Generalmente, los áridos constituyen una gran proporción en la dosificación de mezclas. Por lo tanto, en estructuras de concreto de gran volumen, debido a la reacción exotérmica de hidratación, es necesario utilizar áridos con alta difusividad térmica (Arredondo, 1981). Las características térmicas del concreto que gobiernan el flujo de calor en puentes y controlan el comportamiento tensión-deformación frente a las acciones térmicas son: la conductividad térmica, la difusividad térmica, el calor específico y el coeficiente de dilatación térmica (α).

Para el análisis de los efectos térmicos en la estructura, es fundamental comprender cómo las variaciones diarias y estacionales en la temperatura del aire, la radiación solar y otros factores

ambientales afectan la distribución térmica en los elementos estructurales. La magnitud de estos efectos térmicos depende de las condiciones climáticas locales, la orientación y masa de la estructura, así como de los acabados y, en estructuras de edificios, los sistemas de calefacción, ventilación y aislamiento térmico (EN 1991-1-5, 2003).

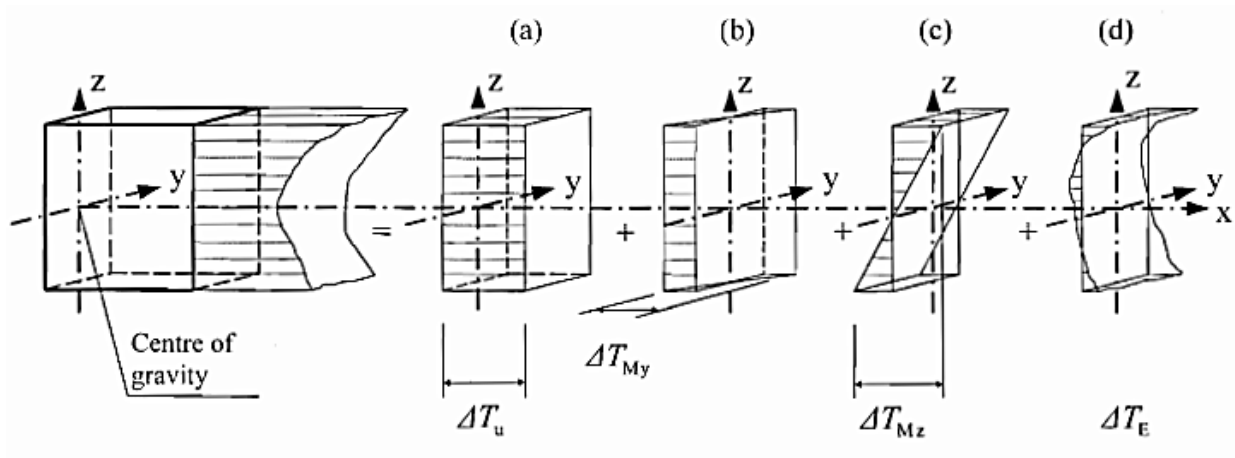
La distribución de temperatura en un elemento estructural puede descomponerse en cuatro componentes esenciales, como se muestra en la Figura 5:

- (a) Un componente de temperatura uniforme (ΔT_u);
- (b) Un componente de diferencia de temperatura lineal alrededor del eje z-z (ΔT_{My});
- (c) Un componente de diferencia de temperatura lineal alrededor del eje y-y (ΔT_{Mz});
- (d) Un componente de diferencia de temperatura no lineal (ΔT_E).

Figura 5

Representación esquemática de los componentes constituyentes de un perfil de temperatura.

Fuente: EN 1991-1-5 (2003).



Estos componentes generan un sistema de esfuerzos autoequilibrados que no producen carga neta en el elemento. Los esfuerzos resultantes dependerán de la geometría y condiciones de

borde del elemento, así como de las propiedades físicas del material, y deben considerarse especialmente cuando se emplean materiales con diferentes coeficientes de expansión lineal (EN 1991-1-5, 2003).

1.4. Ecuación diferencial de gobierno para el fenómeno de transferencia de calor en puentes de concreto.

Una vez evaluados los parámetros que influyen en el intercambio de temperatura a través del puente de concreto, se pueden determinar las condiciones de contorno necesarias para estudiar el fenómeno físico mediante su correspondiente ecuación bidimensional de gobierno (Rao, 2005), que es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \dot{q} = 0$$

Condiciones de contorno:

$$\begin{aligned} T &= T_o(x, y) \text{ en } S_1 \\ k_x \frac{\partial T}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} l_y + q &= 0 \text{ en } S_2 \\ k_x \frac{\partial T}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} l_y + h(T - T_\infty) &= 0 \text{ en } S_3 \end{aligned}$$

Donde:

k_x y k_y → son los coeficientes de conductividad térmica en las direcciones principales (x, y)

\dot{q} → es la fuerza de la fuente de calor

q → es la magnitud de flujo de calor límite

$h(T - T_\infty)$ → es el flujo de calor superficial debido a la convección

l_x y l_y → corresponden a los cosenos de los vectores unitarios normales a la superficie

Al analizar teóricamente los efectos térmicos ambientales en los puentes de concreto reforzado y estudiar la transferencia de calor a través del material, es necesario adoptar ciertas

hipótesis sobre el material para lograr una precisión adecuada. Estas hipótesis incluyen la suposición de un medio continuo, isotropía térmica, homogeneidad y permanencia térmica (González, 1981). La hipótesis del medio continuo asume que el concreto se comporta como un material sin discontinuidades a nivel macroscópico, lo que simplifica el análisis matemático. La isotropía térmica implica que las propiedades térmicas del concreto son iguales en todas las direcciones, mientras que la homogeneidad supone que estas propiedades son uniformes en todo el material. La permanencia térmica se refiere a la estabilidad de las propiedades térmicas del concreto a lo largo del tiempo. Estas hipótesis permiten aplicar los fundamentos matemáticos que describen el fenómeno de la transferencia de calor de manera más efectiva y precisa (Neville, 1995).

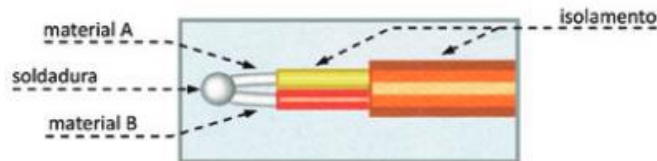
1.5. Sistemas de medición de temperatura

La medición de temperatura puede realizarse con o sin contacto directo con el elemento a medir. Para mediciones con contacto, se utilizan transductores de temperatura como termopares (o termocuplas), termómetros resistivos (RTD), termistores (NTC) y semiconductores, que requieren contacto directo con la superficie. Estos dispositivos convierten la magnitud física de la temperatura en una señal eléctrica proporcional a dicha magnitud (Morcelle, 2018).

El termopar, por ejemplo, es un sensor de temperatura compuesto por la unión de dos materiales conductores mediante una junta de soldadura (Figura 6) o el apriete de los dos metales conductores. Cuando esta unión se enfría o calienta, se genera una tensión proporcional a la temperatura que se desea registrar (Rul, 2019).

Figura 6

Termopar con junta de soldadura sin bulbo de recubrimiento. Fuente: Rul (2019).



Los termopares son utilizados debido a su amplio rango de medición, rápida respuesta y durabilidad en condiciones extremas. Existen diferentes tipos de termopares, clasificados según los materiales conductores utilizados, como los tipos J, K, T y E, cada uno con sus propias características y aplicaciones específicas. Por ejemplo, el termopar tipo K, hecho de níquel-cromo y níquel-aluminio, es comúnmente utilizado en aplicaciones industriales debido a su amplio rango de temperatura y resistencia a la oxidación (Omega Engineering, 2023).

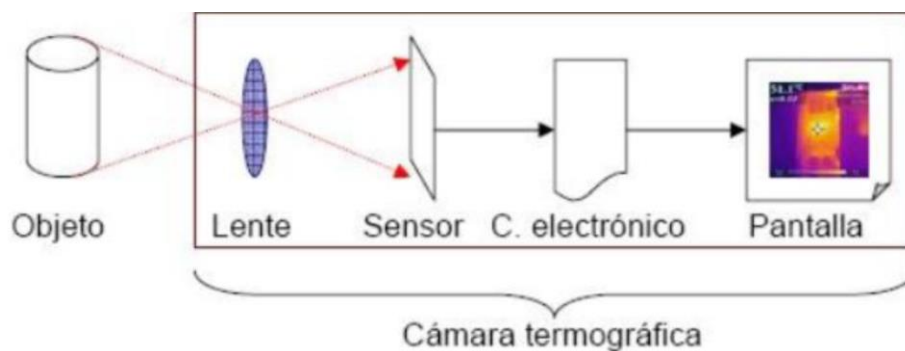
Por otro lado, la medición de temperatura sin contacto directo puede realizarse mediante cámaras termográficas, que utilizan sensores infrarrojos para detectar y medir la irradiación de calor de un objeto. Estas cámaras registran la temperatura de cada píxel en una imagen térmica, asignando colores específicos a diferentes temperaturas (Figura 7). Un rango típico de medición para estos dispositivos es de -20°C a 2000°C (Serna et al. , 2010). En las imágenes térmicas, las temperaturas más bajas se representan con colores fríos como violeta, azul o verde, mientras que las más altas se muestran con colores cálidos como amarillo, rojo o naranja (Prado, 2008).

Las cámaras termográficas son valiosas en diversas aplicaciones, como la inspección de infraestructuras, la detección de fallos en sistemas eléctricos y el monitoreo de procesos industriales. Su capacidad para proporcionar visualizaciones precisas de las distribuciones de temperatura permite a los ingenieros identificar rápidamente áreas problemáticas y tomar

decisiones informadas para el mantenimiento y la reparación. Además, pueden utilizarse en condiciones extremas y en lugares de difícil acceso, lo que las hace indispensables en ingeniería civil y otras disciplinas técnicas (Distron, 2023; Fluke, 2023).

Figura 7

Esquema de funcionamiento de la cámara termográfica. Fuente: Flickr (2012).



1.6. Factores meteorológicos de Bucaramanga que influyen en las variaciones térmicas del experimento

Características meteorológicas de Bucaramanga: el municipio de Bucaramanga se encuentra ubicado sobre una terraza inclinada de la cordillera oriental, con una latitud norte de $7^{\circ}08'$ con respecto al meridiano de Bogotá y una longitud de $73^{\circ}08'$ al oeste de Greenwich (AMB, 2010). Según Weather Spark (2021) y Weather Atlas (2021) esta ciudad posee características meteorológicas como:

Temperatura ambiente: con un rango general entre 20°C y 27°C , rara vez baja de 18°C o sube por encima de 30°C . siendo febrero el mes más cálido, con un promedio de $25,3^{\circ}\text{C}$ y noviembre el mes más frío, con un promedio de $22,4^{\circ}\text{C}$.

Precipitación: agosto el mes más húmedo, con aproximadamente 362 mm de precipitación total y lluvias cada día; y enero el mes más seco, con aproximadamente 41 mm de precipitación total.

Duración del día: en junio, los días son más largos, con una media de 12 horas y 32 minutos de luz diurna, mientras que, en diciembre, los días son más cortos, con una media de 11 horas y 43 minutos de luz diurna.

Insolación: En agosto, el mes con más sol, hay un promedio de 10 horas y 24 minutos de insolación, mientras que, en enero, el mes con menos sol, el promedio es de 7 horas y 24 minutos de insolación.

Cielo despejado y Nublado: la parte más despejada del año en Bucaramanga se extiende del 5 de diciembre al 4 de marzo, siendo enero el mes más despejado, con el cielo mayormente despejado o parcialmente nublado el 23% del tiempo. En contraste, la parte más nublada del año va del 4 de marzo al 5 de diciembre, siendo abril el mes más nublado, cuando el cielo está nublado o mayormente nublado el 93% del tiempo.

Angulo de incidencia de los rayos solares en Bucaramanga

La incidencia de los rayos solares sobre la superficie terrestre varía a lo largo del día debido a la rotación de la Tierra. La inclinación de los rayos solares depende de tres factores principales, la hora del día y la latitud y época del año:

Hora del día: durante las primeras horas de la mañana y en la tarde, los rayos solares llegan en ángulos oblicuos. A mediodía, los rayos solares inciden de manera más directa sobre la superficie. Este ángulo de incidencia afecta la cantidad de energía solar que llega a una superficie.

A menor ángulo (más oblicuo), mayor es la dispersión de los rayos y, por lo tanto, menor es la energía concentrada en una superficie (González et al. , 2013).

Latitud y época del año: dependiendo de la ubicación geográfica, la inclinación del eje terrestre y la época del año, el ángulo de incidencia también varía. En zonas más cercanas al ecuador, los rayos solares inciden más perpendicularmente a lo largo del año, mientras que, en zonas más alejadas, el ángulo de los rayos es más oblicuo durante todo el año, especialmente en invierno (González et al. , 2013).

La Figura 8 muestra la carta solar específica para el lugar del experimento desarrollado en Bucaramanga, el cual se localiza con latitud de 7.1429461 y longitud de -73.1216562. En la figura se muestran las dos trayectorias solares de inicio y final del experimento, la línea azul corresponde al 09/09/2023 (cerca del equinoccio) y la línea amarilla al 30/10/2023 (más cercano al solsticio). En el eje Y se muestra la elevación del sol, el cual es el ángulo de incidencia de los rayos solares hacia la superficie.

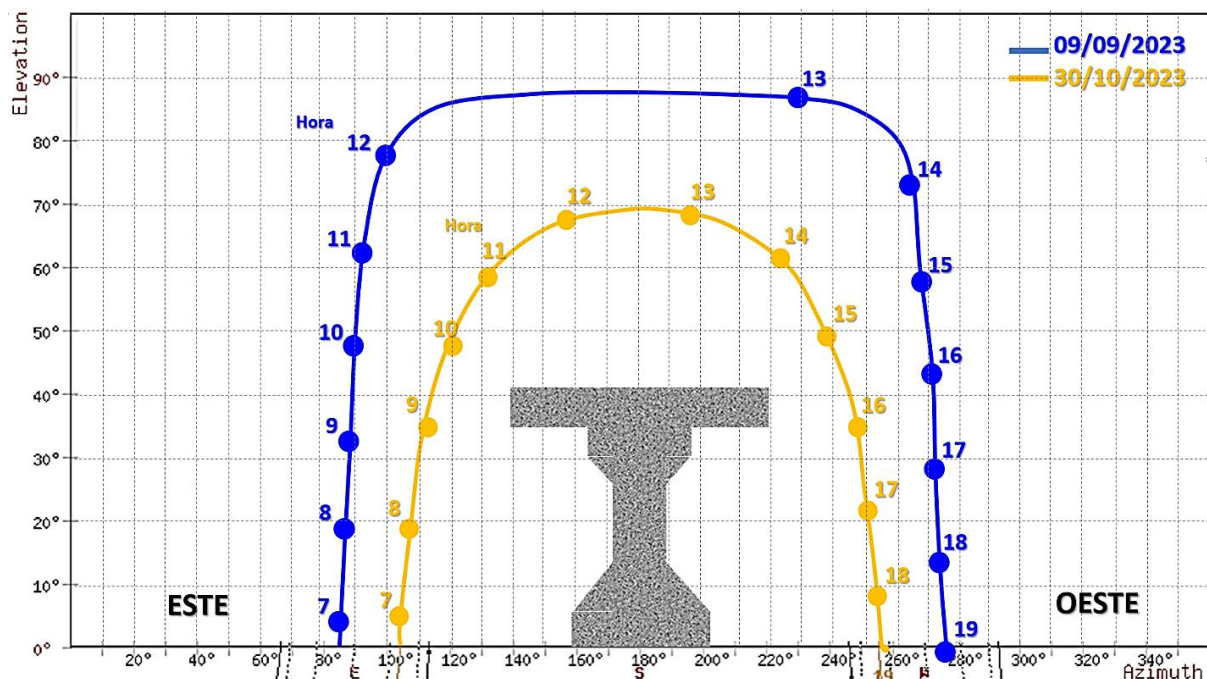
Durante la mañana (7:00 - 9:00), el sol sale por el Este con ángulos de elevación bajos (0° - 30°), los rayos solares inciden lateralmente (cara ESTE) en la viga-losa. En la media mañana (9:30 - 11:30), la elevación solar aumenta significativamente (40° - 80°) con rayos más directos sobre la losa, con mayor uniformidad en el calentamiento de la losa y generando sombras en el alma y aleta inferior. Durante el mediodía solar (12:00 - 14:00), ocurre la máxima elevación solar ($\sim 85^{\circ}$ en septiembre, $\sim 70^{\circ}$ en octubre) con radiación más perpendicular a la superficie de la losa y en este periodo la losa se calienta al máximo. Por la tarde (15:00-17:00), el sol desciende hacia el Oeste con un patrón similar a la mañana, pero en sentido inverso y con un calentamiento gradual del lado Oeste de la viga-losa.

La trayectoria de septiembre muestra mayor elevación solar máxima, mientras que en octubre es más baja, resultando en ángulos más oblicuos, esto afecta la intensidad y distribución del calentamiento en la viga-losa que se muestra en la Figura 8. Los diferentes ángulos de incidencia explican las variaciones térmicas observadas, principalmente al analizar el comportamiento térmico superficial, ya que la viga-losa (mostrada en el centro) recibe radiación diferencial según la hora. Adicionalmente, las sombras auto-proyectadas por los elementos de la propia estructura (alma y aletas) influyen significativamente en los patrones térmicos observados.

Esta carta solar es una herramienta fundamental para entender cómo la posición del Sol afecta el comportamiento térmico de la estructura a lo largo del día y en diferentes épocas del año.

Figura 8

Carta solar para dos fechas en el sitio del experimento. Adaptado de SunEarthTools.com (2024)



1.7. Correlación con coeficiente de Spearman

La correlación de Spearman, asociada al coeficiente ρ de Spearman, es una medida no paramétrica que se utiliza para variables cuantitativas de libre distribución o datos ordinales. A diferencia de la correlación de Pearson, Spearman utiliza los rangos de las variables (X) y (Y) en lugar de sus valores originales (Roy-García et al. , 2019). Esto la hace ideal para datos con valores extremos o distribuciones no normales, ya que no se ve afectada por estos factores ni por cambios en las unidades de medida. Sin embargo, no debe usarse para comparar dos métodos que miden el mismo evento, ya que mide la asociación entre dos cantidades, no su concordancia (Martínez et al. , 2009). Por ejemplo, dos instrumentos que miden la saturación de oxígeno pueden tener una alta correlación, pero baja concordancia si miden sistemáticamente diferentes cantidades. La correlación de Spearman es útil para evaluar la relación entre variables cuando los datos no cumplen con los supuestos de normalidad o presentan valores atípicos (Mondragón, 2014). Sin embargo, es importante considerar varios factores que pueden afectar la correlación de Spearman al transformar los datos. Estos factores incluyen cambios en la distribución de los rangos, pérdida o alteración de información, eliminación de valores extremos y la aplicación de transformaciones no lineales (ConectaPyme, 2023; DATAtab Team, 2024).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general.

Evaluar experimentalmente el gradiente térmico vertical interno y externo en la sección transversal de una viga I compuesta de concreto reforzado, bajo las condiciones climáticas de Bucaramanga.

2.2. Objetivos específicos.

- Determinar el gradiente térmico vertical interno en un segmento de viga construido de concreto reforzado, a partir de las mediciones realizadas con un sistema de monitoreo de contacto embebido en su sección transversal.
- Definir el gradiente térmico vertical externo en un segmento de viga construido en concreto reforzado, a partir de las mediciones realizadas con un sistema de monitoreo sin contacto.
- Establecer la correlación que existe entre el gradiente térmico vertical interno, externo y las variables climáticas.

3. Metodología

En esta sección, se describen los procedimientos y enfoques utilizados para determinar experimentalmente los perfiles de temperatura y el gradiente térmico vertical (GTV) interno y externo en una sección de un segmento de viga-losa de concreto reforzado bajo las condiciones meteorológicas específicas de Bucaramanga.

A continuación, se detallan los pasos y materiales utilizados para realizar esta evaluación, abarcando los equipos y procedimientos de medición, así como el análisis y correlación de datos, en concordancia con los objetivos específicos de la investigación.

3.1. Campaña experimental

El experimento fue desarrollado en un periodo de 120 días continuos de medición de datos, durante el segundo semestre del 2023. A continuación, se detallan las etapas metodológicas que permitieron definir la campaña experimental:

a. Selección del lugar: el primer desafío consistió en seleccionar un lugar adecuado para la ejecución del experimento, que debía ser al aire libre y con buena exposición a las variables meteorológicas de Bucaramanga. El lugar escogido fue la terraza noreste del edificio Álvaro Beltrán Pinzón (ABP) de la Universidad Industrial de Santander, sede Bucaramanga (Figura 9), con una latitud norte de $7^{\circ}08'35''$ con respecto al meridiano de Bogotá y una longitud de $73^{\circ}07'18''$ al oeste de Greenwich. En la terraza se distingue la incorporación de una puerta estratégicamente ubicada, que permitió el control de accesos y la regulación del flujo de personas. Así mismo, la proximidad de una terraza cercana (mezanine del laboratorio), ubicada a 10 metros del sitio donde se instalaría la viga-losa, proporcionando un punto de observación para la colocación de equipos

(computadores, consola de estación, registrador de datos) y vigilancia del experimento. La Figura 10 ilustra la vista a la terraza con la viga-losa desde el mezanine donde se colocaron los equipos.

Figura 9

Terraza Nororiental del Edificio Álvaro Beltrán Pinzón de la UIS



Figura 10

Vista a la terraza desde el mezanine del lab. de estructuras del ABP.



b. Adquisición de equipos e instrumentos: para la campaña experimental se emplearon instrumentos y equipos que incluyeron termopares tipo T, dos cámaras térmicas portátiles, un vehículo aéreo no tripulado (VANT) con cámara térmica incorporada, un registrador de datos (DAQ, por sus siglas en inglés de Data Acquisition), una estación meteorológica y equipos de computación, como se ilustra en la Figura 11. Las especificaciones de los equipos adquiridos se describen a continuación.

Figura 11

Equipos utilizados



- Estación meteorológica *Davis Vantage Pro-2 WLRs*, calibrada desde fábrica y situada en un trípode de montaje a 1.77 metros de altura respecto del suelo. La estación cuenta con los siguientes sensores (Davis Instruments, 2021): temperatura ambiente (precisión $\pm 3^\circ \text{C}$, resolución 0.1°C), humedad relativa (precisión $\pm 2\% \text{RH}$, resolución 1%), precipitación (precisión ± 5 , resolución 1 mm), presión atmosférica (precisión $\pm 0.8 \text{ mmHg}$, resolución 0.1 mmHg), radiación solar (precisión $\pm 5\%$ o full scale, resolución 1 W/m^2), sensor UV (precisión $\pm 5\%$ o full scale,

resolución 0.1 index), Velocidad del viento (precisión ± 1 m/s, resolución 0.4 m/s) y dirección del viento (precisión $\pm 3^\circ$, resolución 1°).

- Termopares tipo T: con un rango de operación es de -75 a $+250^\circ\text{C}$, hechos de acero inoxidable 316. Longitud de sonda estándar de 50 mm y cable de conexión de 10 metros. Terminación en colas peladas, de medición precisa y confiable de la temperatura (Sterling Sensors, 2019). Estos sensores fueron escogidos por su exactitud para medir temperaturas cercanas a las ambientales, ya que los tipos K y N están diseñados para rangos de temperatura más altos (más de 900°C). Además, presentan una buena estabilidad a largo plazo, minimizan la desviación y garantizan datos fiables durante el periodo de medición, además de poseer una menor deriva térmica con el tiempo en comparación con otros termopares. Para esta aplicación específica, la resistencia a la corrosión de los termopares tipo T fue crucial, a diferencia del tipo J, que son de hierro y susceptibles a la corrosión (TE Connectivity, 2024). Además, estos sensores fueron comprados a la empresa *Sterling Sensors (UK)* por un costo unitario de 167.998 COP (aproximadamente £32.03 en el 2022 según Exchange-Rates.org (2024)) debido a que fabricarlos en Colombia habría sido más costoso y de menor calidad, según las cotizaciones realizadas.

- Registrador de datos *Hydra Series III Data Acquisition Unit*, tiene un rango de medición de temperatura de -270°C a 400°C , resolución de 0.01°C y exactitud de 0.62°C . Capacidad de 66 canales con entrada analógicas. Memoria interna de 57000 escaneos. Temperatura de funcionamiento de 0°C a 50°C . Dimensiones: 150 mm x 285 mm x 385 mm. Para su uso, es necesaria una hora de calentamiento antes de iniciar mediciones hasta completar especificaciones de incertidumbre (Fluke Calibration, 2020).

- Cámara termográfica portátil *FLIR E6 XT*, genera imágenes térmicas con resolución de imagen térmica de hasta 240×180 (43200 píxeles) infrarrojos y puede medir temperaturas en un rango de -20°C a 550°C . Su precisión es de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ para temperaturas ambientes de 10°C a 35°C y temperaturas del objeto por encima de 0°C . Sus dimensiones son $244 \times 95 \times 140$ mm. Incluye la tecnología MSX[®] (imagen dinámica multiespectral) para mejorar el detalle de las imágenes térmicas y es compatible con la aplicación *FLIR Tools*[®] (Teledyne Flir, 2019).

- Cámara termográfica de mano *FLIR C5*: genera imágenes térmicas de resolución real de 160×120 (19200 píxeles), incluye la tecnología MSX[®], con cámara visual de 5 MP y flash LED. Dimensiones $138 \times 84 \times 24$ mm. Precisión a temperatura ambiente, de 15 a 35°C y temperatura del objeto de 0 a $100^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ (Teledyne Flir, 2020).

- Vehículo aéreo no tripulado (VANT) *DJI MAVIC 2 ENTERPRISE ADVANCED (EU)*: integrado con cámara térmica de resolución 640×512 (327.680 píxeles, zoom digital 16x), cámara visual de 48 MP (zoom digital 32x) y precisión de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ (DJI, 2020).

Se utilizaron programas (software) propios y de libre acceso de los equipos adquiridos para la lectura de temperatura en imágenes térmicas, como son: *DJI Thermal Analysis Tool 3* para el procesamiento de las imágenes del VANT, y *FLIR Tools* y *FLIR Thermal Studio* para las imágenes de las cámaras portátiles.

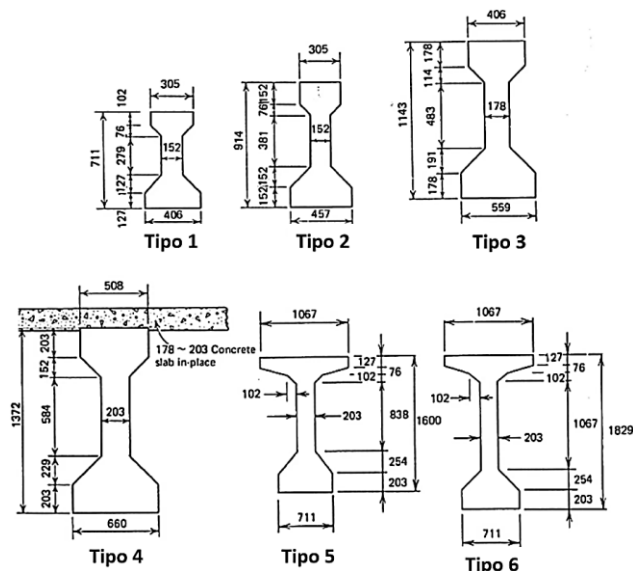
c. Selección del tipo de viga-losa: se consideraron varias secciones AASHTO para la viga (Figura 12) que son las más comunes en Colombia en puentes de tramos cortos (luzes entre 6 y 50 metros). Se eligió la sección tipo I-1 porque su menor altura facilitaría la construcción del modelo y reduciría los costos, esto sin perder la posibilidad de cumplir con los objetivos del trabajo y lograr una sección viga-losa a escala 1:1, especialmente para una viga compuesta exterior de un

puente. Aunque se pudo haber utilizado la sección tipo I-4, se optó por la sección tipo I-1 debido a consideraciones de peso, cantidad de material y las limitaciones en la zona de estudio, específicamente en la terraza del edificio

La longitud seleccionada del espécimen fue de 1.2 m, que es suficientemente representativa para estudiar el fenómeno de la transferencia de calor de forma experimental. La sección viga-loosa resultante y el espécimen a construir representan una mejora en comparación con otros trabajos realizados en secciones tipo I como el de Lee (2012), Hagedorn et al. (2019), quienes no incluyeron la losa en sus modelos experimentales puesto que buscaban analizar la respuesta de la viga durante construcción, antes de que se fundiera la losa.

Figura 12

Dimensiones de vigas AASHTO consideradas. Fuente: AASHTO (2012)



d. Diseño estructural: una vez seleccionada la sección de la viga-loosa, se realizó el diseño estructural del espécimen viga-loosa ($L = 1.2$ m) y su soporte metálico, así como las

verificaciones de resistencia en las viga-losas, viguetas y columnas de la terraza del edificio ABP. Para las verificaciones estructurales se recopilieron los planos de edificio ABP, dados por la oficina de División de Planta Física de la UIS, se hizo el modelo estructural de una sección de la terraza (Figura 13) para luego determinar la relación C/D (capacidad/demanda). Esto se detalla en el trabajo de Ariza (2024), pasante de investigación a cargo de estas tareas. En general, se encontró que los elementos de la terraza permanecían en el rango lineal y elástico bajo las cargas impuestas durante el desarrollo del experimento.

El soporte metálico para el modelo viga-losa fue necesario para mantener su interacción con el viento circundante, además de brindarle estabilidad antes acciones laterales inesperadas. En las Figura 14 y Figura 15 se ilustran los diseños de la viga-losa I compuesta con su refuerzo interno y la estructura metálica de apoyo, respectivamente.

Figura 13

Plano estructural segundo piso del edificio y modelo computacional con cargas aplicadas. Fuente: Ariza (2024)

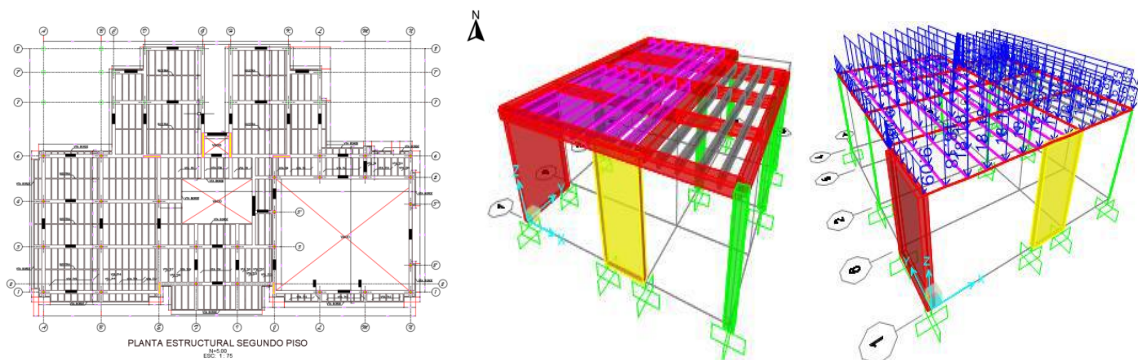
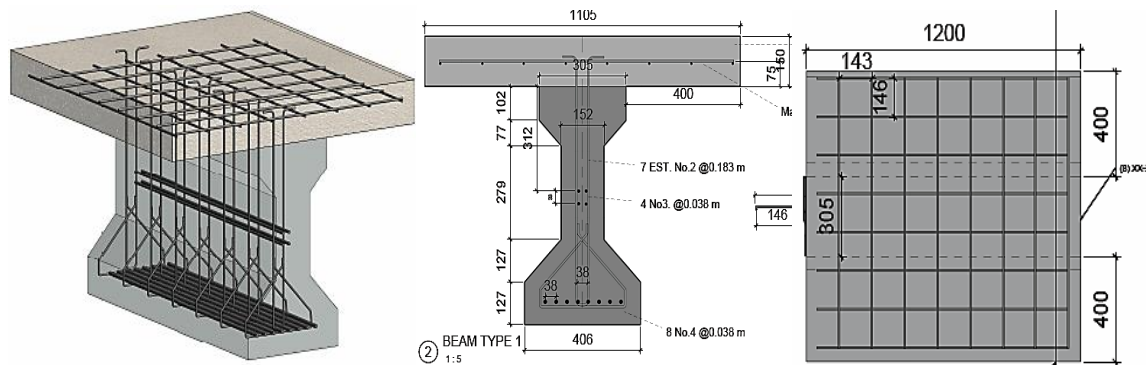
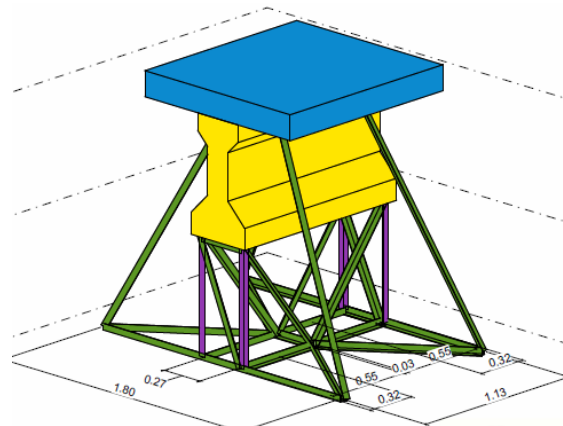


Figura 14

Refuerzo y dimensiones del modelo viga-losta. Fuente: Ariza (2024)

**Figura 15**

Esquema del modelo viga-losta con soporte metálico. Fuente: Ariza (2024)



e. **Preparación de la terraza para el experimento:** la placa de la terraza fue recubierta con una polisombra verde de densidad 80% (Figura 16) para reducir la re-radiación inducida por la placa de la terraza sobre la viga-losta. El color verde fue seleccionado por su menor reflectividad en comparación con otras opciones disponibles. En el Apéndice A se detalla un estudio realizado con diferentes recubrimientos para mitigar este fenómeno. Dado que no se disponía de un método directo para medir o evitar la re-radiación, ese recubrimiento se implementó

como plan de contingencia para minimizar su efecto y asegurar la precisión de los datos recopilados.

Figura 16

Terraza cubierta con polisombra verde



f. Ubicación de la viga-losa: el modelo viga-losa se ubicó estratégicamente en la terraza, posicionándola sobre una columna para garantizar su estabilidad, de acuerdo con el estudio de carga realizado previamente por Ariza (2024). Además, se aseguró que la viga-losa recibiera luz solar directa durante los meses de estudio, desde las 6:30 hasta las 16:00 horas. Esta disposición se determinó a través de un estudio detallado del comportamiento de la sombra a lo largo del año 2023, cuyos resultados se presentan en el Apéndice B.

g. Construcción e instrumentación de la viga-losa: la construcción comenzó el 01/06/2023, siguiendo los planos de diseño. La construcción fue realizada por la empresa García Vega S. A. S de Bucaramanga, bajo la supervisión del autor de este trabajo. La construcción inició con la colocación de la armadura del refuerzo y la instalación de la formaleta sobre el soporte metálico

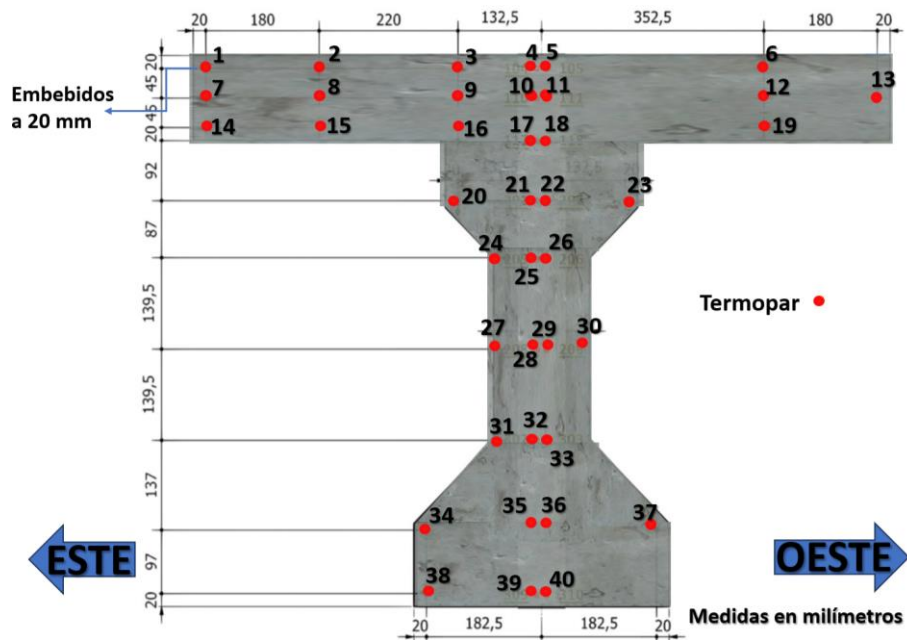
(Figura 17). Además, se verificaron todos los elementos necesarios para la fundición, asegurando que estuvieran en su lugar y listos para el vaciado de concreto.

Figura 17

Colocación del refuerzo de la viga-losa y ensamble de formaleta



Simultáneamente con la instalación del refuerzo y la formaleta, se llevó a cabo la instrumentación interna. Esto implicó sujetar los 40 termopares al acero de refuerzo de la viga-losa, posicionados estratégicamente para capturar variaciones de temperatura en toda la sección (Figura 18) y su cableado fue protegido con un recubrimiento de vinipel para reforzarlo. Los termopares fueron colocados en la mitad del elemento a 0.6 metros de la cara frontal como se muestra en la Figura 19. El espécimen viga-losa fue orientado completamente hacia el norte, asegurando una exposición uniforme a las condiciones meteorológicas y facilitando los análisis detallados de los efectos térmicos a lo largo del día. Todos estos pasos se detallan en los trabajos realizados por Villamil (2023) y Moreno (2024), pasantes de investigación a cargo de dichas tareas.

Figura 18*Ubicación de termopares en la sección central del elemento***Figura 19***Colocación de los termopares sujetos al refuerzo de acero*

h. Fundición de la viga-loso: La fundición de la viga-loso se llevó a cabo el 02/06/2023. Se utilizó concreto diseñado para una resistencia a la compresión de 28 MPa (4000

psi) a los 28 días, aplicado en 8 capas, cada una de ellas debidamente vibrada de forma manual para asegurar la eliminación de vacíos y una correcta consolidación. La granulometría utilizada para el concreto se especifica en Villamil (2023), quien fue el pasante de investigación a cargo de esta tarea. Durante el vaciado, se prepararon cinco cilindros de concreto (de 7.5 cm de diámetro por 15 cm de altura) para verificar la resistencia a la compresión a los 28 días después del fraguado. El ensayo de compresión en los cilindros resultó en una resistencia promedio de 31.6 MPa (± 2.77 MPa), que es 12.77% mayor a la resistencia objetivo (Moreno, 2024). Este hallazgo, detallado en el Apéndice C, indica que el concreto del espécimen tiene propiedades fisicomecánicas que son representativas de los puentes de concreto del país, incluyendo las relacionadas con la transferencia de calor que no fueron medidas. En la Figura 20 se puede observar la aplicación de la penúltima capa de concreto en la formaleta, así como la viga-losa una vez finalizada y pulida por el maestro de obra, quien se aseguró de nivelar correctamente la superficie para obtener una estructura homogénea y de alta calidad.

Figura 20

Penúltima capa de concreto con termopares visibles y viga-losa fundida.



i. Periodo de curado: Una vez terminada la fundición y pasado 24 horas de fraguado, se desencofró el espécimen y se inició el curado por 28 días hasta el 03/07/2023. Durante este tiempo, la viga-losa se cubrió con vinipel (Figura 21) y se regó con agua aproximadamente cada cuatro horas para mantener su humedad.

Figura 21

Condición de la viga-losa durante curado.



j. Fase experimental: Al finalizar el periodo de curado, se planificó iniciar las mediciones el 04/07/2023; sin embargo, debido a problemas técnicos, el inicio formal de las mediciones se pospuso hasta el 10/07/2023. Con la viga-losa descubierta, todos los equipos calibrados y sincronizados, comenzó la fase experimental del estudio. Las actividades incluyeron la recopilación de datos de la estación meteorológica, la captura de fotografías térmicas con las cámaras térmicas (C5, E6 y VANT), y el registro de temperaturas internas de los termopares embebidos en la viga-losa, que estaban conectados al DAQ. Este enfoque integral permitió obtener

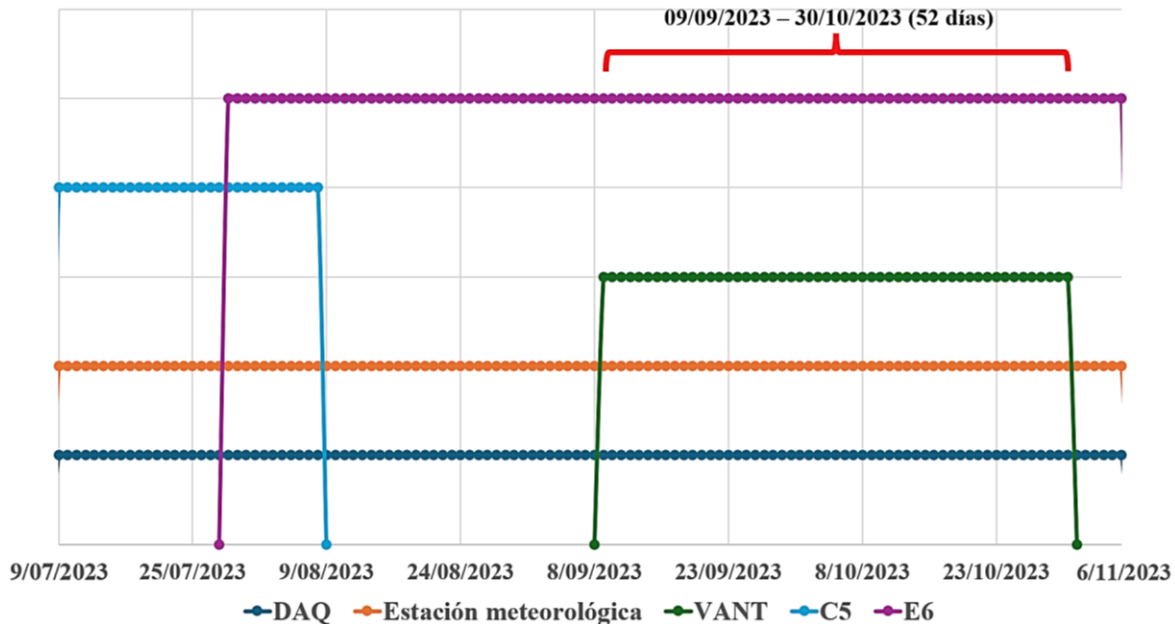
una visión detallada y precisa de las condiciones térmicas y meteorológicas, asegurando la calidad y fiabilidad de los datos recolectados.

La Figura 22 ilustra el tiempo de uso de cada uno de los equipos durante los 120 días del experimento. Inicialmente, se planificó la recopilación de datos durante los 120 días; sin embargo, diversos factores técnicos redujeron significativamente el período efectivo de medición. La DAQ y la estación meteorológica operaron continuamente durante todo el período. El VANT enfrentó desafíos iniciales por una configuración manual desconocida y no ejecutada adecuadamente, que retrasó su pleno funcionamiento hasta el 08/09/2023, cuando se solucionó el problema y se pudieron tomar fotografías térmicas con lecturas de temperatura precisas y calibradas. No obstante, el 31/10/2023, problemas de actualización impidieron la conexión entre el VANT y su consola de mando, finalizando así su operatividad. En consecuencia, el periodo efectivo de medición para el VANT fue del 09/09/2023 al 30/10/2023.

La cámara portátil Flir C5 funcionó correctamente al inicio del experimento, pero gradualmente perdió su calibración, resultando en lecturas incorrectas y fotografías imprecisas, complicando el procesamiento de las imágenes y generando considerable incertidumbre en las mediciones. Debido a esto, las imágenes de la C5 se descartaron en este trabajo. Por su parte, la cámara portátil Flir E6 se usó a partir del 28/07/2023, ya que no había sido entregada por el proveedor (ACRE Colombia S. A. S.) hasta esa fecha, y fue operada sin inconvenientes hasta finalizar el experimento.

Figura 22

Tiempo de correcto funcionamiento de los equipos.



De los 120 días planificados (10/07/2023 al 06/11/2023), solo 52 días (del 09/09/2023 al 30/10/2023) fueron efectivamente utilizados debido a diversos problemas técnicos. Este período representa el intervalo óptimo con los equipos esenciales funcionando correctamente para este trabajo (VANT, cámara térmica E6, termopares, DAQ y estación meteorológica). Esta situación destaca la importancia de la flexibilidad en la planificación de experimentos de campo a largo plazo.

3.1.1. Medición de temperatura interna, externa y monitoreo de las variables meteorológicas.

La medición de las variables meteorológicas, la temperatura interna y externa, con su análisis, se realizó como se describe a continuación.

Variables meteorológicas de la zona de estudio.

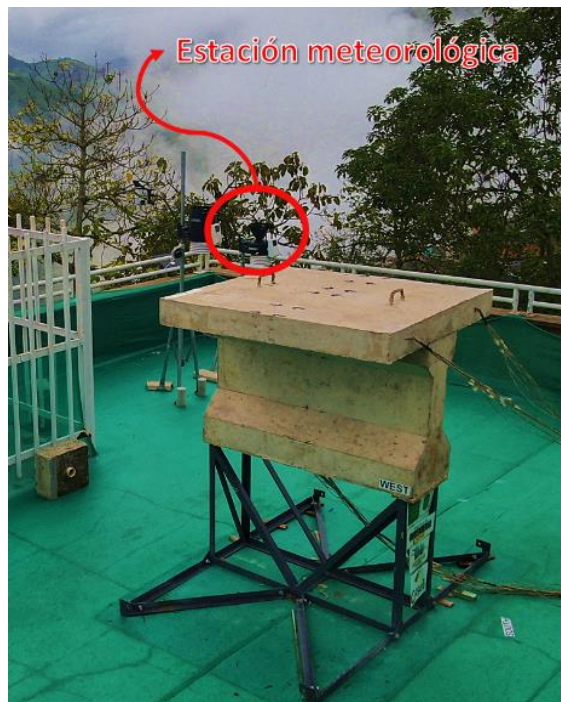
En el presente estudio, se examinaron cinco variables meteorológicas para determinar su impacto en las temperaturas internas y externas de la viga-losa bajo análisis. Estas variables son:

la temperatura ambiente, la radiación solar, la velocidad del viento, la precipitación y la dirección del viento. A continuación, se describe el procedimiento seguido para recopilar y analizar dichas variables:

La estación *Davis Vantage Pro-2 WLRS* se ubicó a no más de 3 metros del espécimen (Figura 23) para asegurar la representatividad de los datos meteorológico. Antes de iniciar el estudio, la estación ya se encontraba en funcionamiento y contaba con la calibración por el vendedor (K-2 Ingeniería S. A. S.). La estación funcionó de manera continua desde el 10/07/2023 a las 6:00 horas, tomando lectura de las variables meteorológicas cada 30 minutos sin parar hasta el 06/11/2023 a las 18:00 horas.

Figura 23

Estación meteorológica instalada en la terraza.



Para analizar los resultados de las mediciones de la temperatura ambiente y la radiación solar, se seleccionaron los valores máximos y mínimos diarios, representando los valores más altos y bajos medidos cada día, respectivamente. Además, se calculó la diferencia entre esos valores máximos y mínimos para cada jornada. Utilizando Matlab[®] (MathWorks, 2024), se generaron gráficos que visualizan estos datos diarios. Junto a estos gráficos, se incluyen las estadísticas descriptivas como la media, mediana, moda, varianza y desviación estándar de todos los valores de temperatura ambiente y radiación solar registrados en los 52 días.

Para el análisis de los valores de precipitación diaria y la velocidad del viento, se calcularon los promedios diarios a partir de las 20 mediciones de cada día, debido a que estas variables meteorológicas incluyen valores de cero, y analizarlas mediante máximos y mínimos diarios no sería representativo. La representación gráfica de ambas variables también se realizó con Matlab[®] (MathWorks, 2024), acompañada de la estadística descriptiva general de todos los datos medidos para cada caso, proporcionando información valiosa para interpretar los resultados y comprender las tendencias climáticas en el contexto del estudio.

La dirección del viento fue registrada de igual forma cada 30 minutos por el anemómetro de precisión integrado en la estación meteorológica. Los datos recolectados se agruparon según las direcciones cardinales (N, S, E, O) y colaterales (NE, NO, SE, SO), y sus respectivos valores de azimut se aprecian en la Figura 24. Al ser una variable categórica, se calculó el conteo total de observaciones para cada dirección del viento y se expresó en términos de frecuencia absoluta y relativa (%). Los datos fueron cuidadosamente procesados para asegurar su precisión, incluyendo la identificación y el manejo de cualquier falla de lectura. En casos de falla de lectura, estos datos se registraron por separado para mantener la integridad del conjunto de datos.

en un VANT y la cámara portátil Flir C5 (esta última por problemas de calibración de descartó para el interés de este estudio). El posicionamiento de los dispositivos fue clave para asegurar mediciones precisas y consistentes.

El VANT se sobrevoló la viga-losa de manera controlada y estable, manteniendo una distancia de aproximadamente dos metros para tomar las fotografías (Figura 25). Su alta resolución permitió captar detalles precisos de la temperatura externa, incluso a una mayor distancia. En cada instante se tomaron dos fotografías térmicas con el VANT, desde una perspectiva lo más paralela posible a la superficie a fotografiar. Para cada instante se obtuvieron dos fotografías, una del espectro visible (Figura 26) y otra del espectro infrarrojo (Figura 27) de las caras SUPERIOR y ESTE. Es importante aclarar que el VANT se utilizó cuando las condiciones meteorológicas lo permitieron. En caso de lluvia o vientos demasiado fuertes, no se realizó el sobrevuelo, lo que ocasionó que en algunas ocasiones no se pudieran llevar a cabo las respectivas mediciones con este dispositivo.

Figura 25

Esquema con sobrevuelo del VANT a la viga-losa.

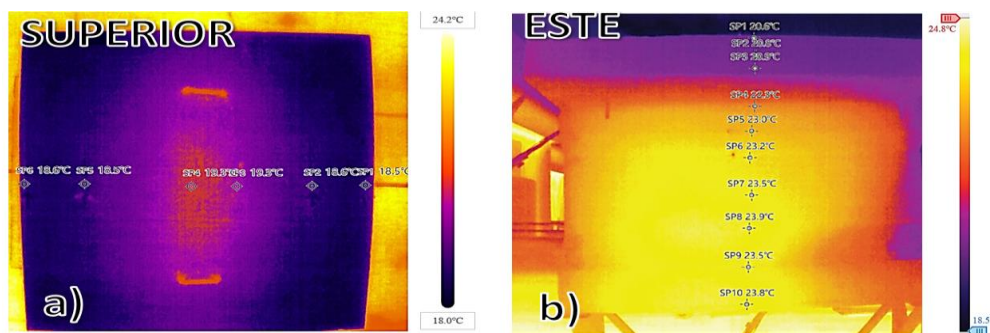


Figura 26

Fotografías de espectro visible con puntos de medición señalados en las caras de interés.

**Figura 27**

Fotografías térmicas del VANT con temperatura medida en los puntos de medición.



Las cámaras portátiles, se ubicaron a una posición fija y marcada previamente en el suelo de la polisombra, para garantizar la consistencia en cada medición. La cámara Flir C5 se encontraba fijada en un trípode con apertura estática, asegurando una distancia y ángulo de la toma de fotos invariable. La cámara Flir E6 se colocaba junto a la C5 y se tomaba la fotografía térmica de forma simultánea (Figura 28). En cada instante se tomaban dos fotografías térmicas, una de la cara ESTE y otra de la OESTE, siempre tratando de ubicar las cámaras en posición frontal respecto a cada

cara de la viga-losa. Aunque hubo interrupciones con las mediciones realizadas por estas cámaras debido a la lluvia u otros factores, estas fueron menores en comparación con las del VANT.

Figura 28

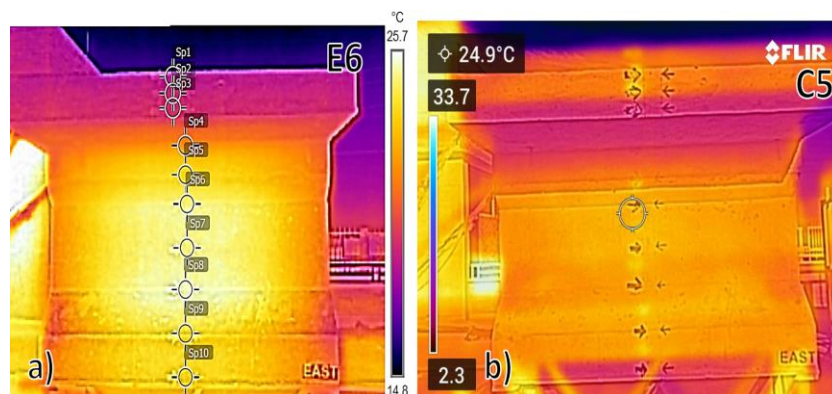
Posicionamiento de las cámaras portátiles.



En la Figura 29 se pueden apreciar las imágenes térmicas de cada cámara portátil, además se puede apreciar como la cámara C5 capturaba imágenes distorsionadas que dificultaron el procesamiento de estas, lo cual no ocurrió con la E6, por lo que se decidió utilizar solo las imágenes térmicas tomadas por esta última.

Figura 29

Imágenes térmicas tomadas por las cámaras portátiles (a) E6 y (b) C5



Posteriormente, las fotografías térmicas obtenidas con la cámara portátil Flir E6 y el VANT se analizaron mediante los programas "*FLIR Tools*" y "*DJI Thermal Analysis Tool 3*", respectivamente, ambos proporcionados por los fabricantes de los equipos. Cada imagen térmica se procesó manual e individualmente: se analizaron 1032 fotografías de la cámara E6 y 1006 del VANT, realizando mediciones de la temperatura superficial en puntos de medición específicos que fueron marcados previamente en las caras de interés de la viga. Después del procesamiento, las imágenes se agruparon por día en informes consolidados en formato PDF, que incluían las fotografías térmicas y las temperaturas registradas en los puntos de interés. Luego, las temperaturas superficiales de cada punto de medición se transcribieron manualmente a hojas de cálculo en Excel, organizadas por fecha y hora de captura. Este método permitió la captura y análisis de datos de temperatura a lo largo del día, y la transcripción manual facilitó la detección oportuna de fotografías térmicas procesadas incorrectamente.

Para la visualización de datos se desarrolló una aplicación en Matlab[®], la cual extrajo información de la temperatura superficial de cada instante de medición a partir desde las hojas de cálculo de Excel generados tras el procesamiento de imágenes térmicas. Se generaron 52 gráficas que contienen los perfiles diarios de medición por cada dispositivo, facilitando un análisis detallado a lo largo del tiempo. Estas graficas están detalladas en los Apéndice D y Apéndice E.

Una vez obtenidos los valores de los perfiles verticales de temperatura en Excel, se seleccionó una escala adecuada para los ejes del gráfico basada en el rango de valores observados. El eje Y representó la profundidad de la viga-losa en milímetros (mm), medidas desde la superficie de la losa, mientras que el eje X mostró los valores de temperatura superficial en grados Celsius (°C), ambos con sus respectivas unidades etiquetadas. Los datos se representaron mediante puntos

conectados por líneas. Para mejorar la visualización y facilitar la interpretación, se emplearon diferentes colores o símbolos para diferenciar cada instante de tiempo. Esta estrategia permitió una identificación clara de los datos correspondientes a cada período del día.

Posteriormente, se analizaron los perfiles de temperatura obtenidos. En un principio, todos los perfiles se agruparon en un conjunto general, resultando en 1006 con el dron y 1032 con la cámara portátil. Sin embargo, para obtener un análisis más representativo y detallado, los perfiles se clasificaron en franjas horarias de dos horas (Tabla 1). Este enfoque facilitó el estudio de las tendencias horarias de la temperatura superficial para cada dispositivo.

Tabla 1

Franjas horarias

Franja horaria	Rango de horas
1	6:30 – 8:30
2	9:00 – 11:00
3	11:30 – 13:30
4	14:00 – 16:00

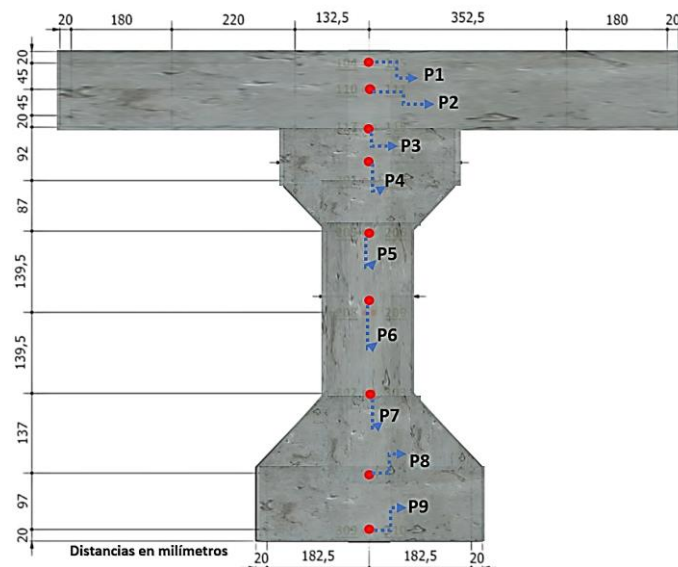
Además, se analizaron las series temporales a lo largo del período de estudio, observando las fluctuaciones de temperatura en el tiempo. También se estudiaron las series temporales individuales en cada punto de medición, lo que permitió identificar variaciones específicas en diferentes horas del día. Finalmente, se realizó un resumen estadístico de los datos obtenidos para cada dispositivo, incluyendo medidas de tendencia central y dispersión. Para asegurar la validez de los resultados, se verificó la normalidad de las distribuciones utilizando la prueba de Lilliefors, al igual que para las variables meteorológicas.

Medición de la temperatura interna con el sistema de monitoreo térmico de contacto.

La lectura de la temperatura interna se hizo a partir de los registros tomados por los termopares embebidos en el concreto y conectados al DAQ. Para este trabajo de grado, solo se analizaron los datos de los nueve puntos de interés mostrados en la Figura 30, los cuales corresponden a puntos ubicados en el eje de simetría de la sección. Cada punto alberga una pareja de termopares (Figura 18) para asegurar redundancia en las mediciones. Los valores de cada pareja se promediaron para establecer la temperatura registrada en cada punto. La recopilación de los datos se hizo de forma numérica y organizada con fecha y hora respectiva en archivos tipo CSV generados por el registrador de datos.

Figura 30

Ubicación de los termopares analizados en este trabajo.



A partir de los archivos CSV generados por la DAQ, se desarrolló una aplicación en Matlab® para la visualización gráfica de los datos de temperatura interna de viga-losa a diferentes profundidades y a lo largo del día. Este enfoque permitió una captura y análisis detallado de los

datos, resultando en la generación de 52 gráficas que contenían los 20 perfiles de cada día medición. Cada gráfica de datos representa los perfiles verticales de temperatura interna obtenidos en un día específico de medición y todos están detallados en el [Apéndice F](#). La escala y otros aspectos de visualización de los perfiles térmicos internos se realizaron de la misma manera que para los perfiles térmicos externos. Posteriormente, se agruparon los 1040 perfiles térmicos internos para un análisis general y por franjas horarias. Además, también se analizaron las series de tiempo generales e individuales en cada punto de medición, se realizó un resumen estadístico de los datos obtenidos, y se verificó la normalidad de los datos mediante la prueba de Lilliefors.

3.2. Determinación del gradiente vertical externo y la temperatura mínima externa.

Para determinar el gradiente térmico vertical (GTV) externo, se utilizaron únicamente las mediciones obtenidas con el VANT. Aunque los valores registrados con la cámara portátil presentan diferencias cuantitativas, detalladas en la sección. 4.2.14.2.183), estas no afectan significativamente los resultados principales. Además, el VANT proporciona mayor precisión en el registro térmico y permite una representación más realista del experimento, facilitando su extrapolación a escenarios reales, como un puente en condiciones operativas.

Para definir el GTV externo, se emplearon las mediciones de la cara ESTE de la viga-losa. La metodología siguió el procedimiento descrito por (J. -H. Lee, 2012), en este estudio se restaba la temperatura más baja (temperatura mínima o temperatura de referencia) a lo largo de la profundidad del perfil en cada medición a todas las temperaturas registradas en el instante de tiempo para determinar el gradiente. Se realizaron mediciones en diez puntos superficiales de interés en la viga-losa, obteniendo un total de 20 GTV externos por día. Estos gradientes describen cómo varía la temperatura externa a lo largo del día en la sección de simetría de la viga-losa,

proporcionando una representación precisa del comportamiento térmico respecto a una temperatura base.

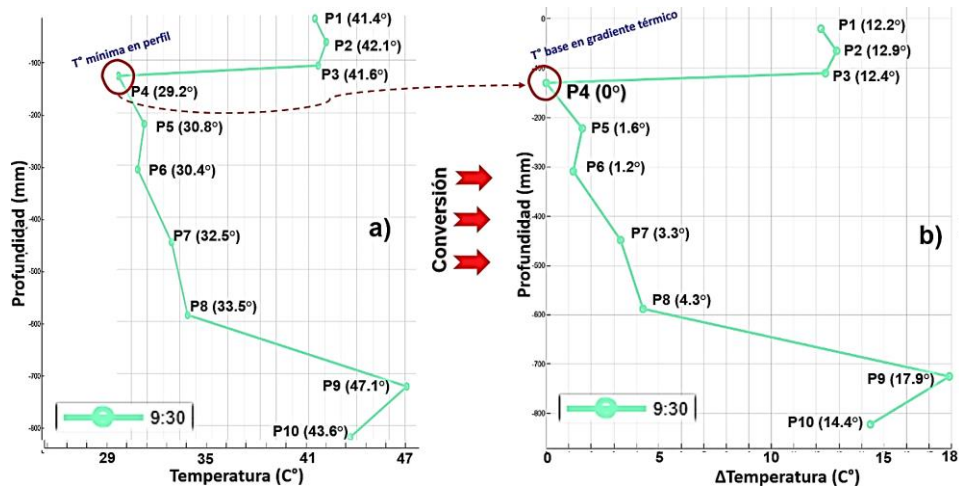
Para definir las temperaturas mínimas o de referencia necesarias para determinar los GTV externos, se implementó una metodología detallada y sistemática. En cada instante de medición, se identificaron las temperaturas mínimas a lo largo de la profundidad del perfil en la cara ESTE de la viga-losa. Este proceso se repitió para un total de 1006 registros de medición. Los datos recolectados se agruparon y contaron según la profundidad de los puntos de medición.

El gradiente térmico vertical externo se definió restando la temperatura más baja a lo largo de la profundidad del perfil en cada medición, de la siguiente manera:

Al analizar los perfiles de temperatura, se identificó el punto con la temperatura mínima en cada momento de medición. Este valor, denominado "T° mínima en perfil", se utilizó como base para calcular el gradiente térmico. Posteriormente, este valor base se restó de las temperaturas en todos los demás puntos, resultando en el gradiente térmico vertical. Por ejemplo, la Figura 31a muestra el perfil vertical de temperatura externa medido con el VANT a las 9:30 horas del 11/09/2023. En este momento, el punto con la menor temperatura absoluta (29.2°C) se encuentra en P4 (interfaz viga-losa), mientras que la mayor temperatura (47.1°C) se registra en P9. La Figura 31b ilustra el gradiente térmico vertical (GTV) calculado, en el que el valor de ΔT es igual a cero en P4 y alcanza los 17.9°C en P9, representando el mayor ΔT de todo el período de medición. Este gradiente negativo entre P4 y P9 indica que la temperatura aumenta con la profundidad. En el caso del punto P10, la temperatura externa muestra una disminución, mientras que en la losa (P1, P2 y P3) las variaciones son mínimas, sin exceder los 0.7°C.

Figura 31

Variación térmica 11/09/2023- 9:30: (a) Perfil vertical de temperatura y (b) GVT



3.3. Determinación del gradiente vertical interno y la temperatura mínima interna.

Para definir las temperaturas mínimas o base necesarias para determinar los GTV internos, se implementó una metodología similar a la utilizada para las mediciones externas. En cada instante de medición, se identificaron las temperaturas mínimas a lo largo de la profundidad de la viga-losa. Este proceso se repitió para un total de 1040 registros de medición. Los datos recolectados se agruparon y contaron según la profundidad de los puntos de medición.

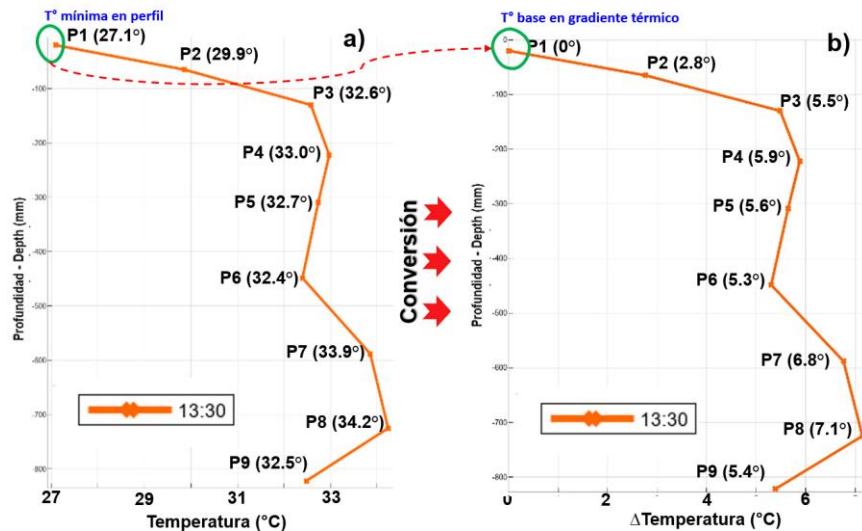
Para las temperaturas interna se sigue el mismo procedimiento para calcular los gradientes térmicos externos, por ejemplo, en la Figura 32a se presenta el perfil vertical de temperatura interna de las 13:30 horas del día 23/09/2023. En este caso, la temperatura mínima en el perfil se encuentra en el punto P1 (27.1°C), mientras que la mayor temperatura se registra en el punto P8 (34.2°C). La Figura 32b muestra el GTV interno calculado. En el punto más superficial de la sección (P1), la magnitud de ΔT es de 0°C. La temperatura aumenta rápidamente, alcanzando $\Delta T=2.8^\circ\text{C}$ en el punto P2. El aumento de la temperatura relativa (ΔT) continúa de forma más gradual hasta P4, donde se

mantiene entre 5.5°C y 5.9°C . Hay una ligera disminución de temperatura entre P4 y P6, disminuyendo a 5.3°C . En los puntos más profundos se tiene un aumento de ΔT , alcanzando un máximo de 7.1°C en P8. Posteriormente, se observa una disminución del ΔT en el punto más profundo (P9), disminuye a 5.4°C .

Figura

32

Variación térmica 23/09/2023 – 13:30: (a) Perfil vertical de temperatura y (b) GVT.



El procedimiento usado para determinar los gradientes térmicos convierte las temperaturas absolutas en temperaturas relativas, tomando como referencia la temperatura base (temperatura mínima) en el instante de medición. Esto facilita la visualización de las variaciones de temperatura en relación con el punto más frío del perfil (Hagedorn et al. , 2019) y permite identificar gradientes térmicos verticales, con la Figura 31 y Figura 32 mostrando cómo los valores absolutos de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) en la parte a) de cada figura se transforman en diferencias de temperatura ($\Delta T^{\circ}\text{C}$) en la parte b), manteniendo la misma estructura de puntos y profundidades.

Una vez obtenidos los gradientes térmicos verticales, estos se agruparon en las franjas horarias de interés (Tabla 1) para facilitar el análisis del comportamiento térmico de la sección. Este enfoque permitió observar cómo variaban los gradientes térmicos a lo largo del día en la viga-losa, proporcionando una visión integral de las tendencias térmicas.

3.4. Determinación de las correlaciones.

Aunque inicialmente se perseguía correlacionar los gradientes térmicos internos y externos, en este estudio, se optó por utilizar los perfiles de temperatura (es decir, la temperatura absoluta) en lugar de correlacionar directamente los gradientes (ΔT) debido a razones técnicas y metodológicas. Como se discute detalladamente en la sección 0. Los perfiles de temperatura ofrecieron una alternativa más precisa y manejable para entender las variaciones térmicas y establecer correlaciones significativas. Por lo tanto, se consideró que este enfoque seguía cumpliendo con el objetivo original del estudio, ya que los perfiles de temperatura reflejaban las mismas variaciones que los gradientes calculados. Para la decisión de este enfoque se consideraron los siguientes factores:

Cambios en la distribución de rangos: al restar el mínimo horario en los valores medidos en cada instante, se alteraba la distribución de los datos, lo que afectó los rangos relativos y, por ende, la correlación de Spearman.

Pérdida de información: la transformación de los perfiles de temperatura a gradientes redujo la variabilidad en los datos, ya que, si todos los valores se vuelven positivos, negativos o quedan en un rango limitado (por ejemplo, de 0 a 15°C), la variabilidad puede no ser suficiente para mantener la misma relación monotónica.

Efecto de valores extremos: la correlación de Spearman es sensible a los cambios en los rangos. Al transformar los perfiles a gradientes, se redujo la influencia de valores extremos (porque ya aparecen valores de cero) y esto afecta la correlación.

Escala de medición: aunque la correlación de Spearman no se ve afectada por transformaciones lineales (como restar un valor constante a la totalidad de datos), las transformaciones no lineales (como restar un valor diferente para cada instante de medición) pueden alterar la relación entre los datos.

Por lo anterior, se realizó un análisis de correlación utilizando el coeficiente de Spearman (Martínez et al. , 2009) para evaluar la relación entre los datos punto a punto de los perfiles de temperatura interna, externa y las variables meteorológicas, el coeficiente de Spearman es definido por la siguiente ecuación:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

Donde n es el número de pares (X,Y) y $d_i = r_{xi} - r_{yi}$ es la diferencia entre los rangos de X e Y. Este se basa en la sustitución de los valores originales de cada variable por sus rangos, los cuales se asignan según el orden numérico de los datos de la variable. Para calcularla, es necesario ordenar los valores de cada sujeto para las variables (X) y (Y), y asignarles un rango. Si existe una correlación fuerte, los rangos serán consistentes: rangos bajos de (X) se correlacionarán con rangos bajos de (Y).

Este análisis permitió determinar la fuerza y la dirección de la relación entre los valores de temperatura en los puntos de medición específicos. Los datos de temperatura interna y externa se exportaron desde los archivos CSV a *RStudio*[®], para evaluar la relación entre estas y las variables

meteorológicas. Para ello se usó la función “*correlation*”, especificando el uso del coeficiente de correlación de Spearman, así:

```
#Cargar los datos
data <- read.csv("data.csv")

#Calcular la correlación de Pearson
correlation <- cor(data$X, data$Y, method = "spearman")

#Mostrar el resultado
print(correlation)
```

Donde “data\$X” son los datos de temperatura interna que se correlacionaron con “data\$Y”, que son las temperaturas externas tomadas con el VANT o los valores de las variables meteorológicas.

Los datos de temperatura interna se almacenaron en la variable “data\$X”. Esta variable se correlacionó en dos ocasiones: primero, con las temperaturas externas registradas por el VANT en la variable “data\$Y”; y segundo, con cada una de las variables meteorológicas (temperatura ambiente, radiación solar, velocidad del viento y precipitación). Es importante destacar que las temperaturas externas no se correlacionaron con las variables meteorológicas, ya que no presentan una relación física significativa en el contexto de este estudio, pues el objetivo principal es evaluar el comportamiento térmico a nivel interno de la estructura, dado que las condiciones internas son las que influyen directamente en la integridad y el desempeño del material. Posteriormente, se recopilaron los valores de los coeficientes de correlación (ρ) junto con sus respectivas significancias.

Los resultados del análisis e interpretación de la correlación se resumieron en tablas, mostrando los coeficientes de correlación de Spearman para cada par de puntos de medición y expresando en estas la dirección (positiva o negativa), y fuerza (baja, moderadas a fuertes), y el nivel de significancia de la correlación.

4. Resultados.

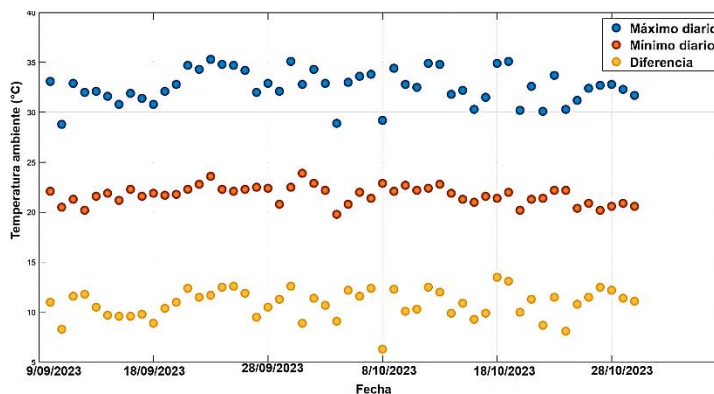
4.1. Variables meteorológicas.

En esta sección se presentan y discuten las mediciones del monitoreo diario de las variables ambientales que fueron tomadas con la estación meteorológica, las cuales son claves para entender el comportamiento térmico interno y externo de la sección viga-losa. Se analizaron las variables meteorológicas que influyen fuertemente en el fenómeno estudiado, a saber, la temperatura ambiente, la radiación solar, la precipitación, la velocidad y dirección del viento. Los datos cuantitativos de las variables meteorológicas están disponibles en el Apéndice G. Como se mencionó en la metodología, estas mediciones se hicieron por 52 días consecutivos (09/09/2023 – 30/10/2023, entre las 6:30 hasta las 16:00 horas) para un total de 1040 datos por cada variable. A continuación, se describen las tendencias generales observadas en el periodo de medición de las variables meteorológicas.

La Figura 33 muestra la variación de la temperatura ambiente máxima y mínima diaria, así como la diferencia correspondiente entre ambas temperaturas, durante el periodo de medición. La temperatura ambiente osciló entre 19.8°C y 35.3°C en las horas de estudio. La Tabla 2 muestra el resumen estadístico de los datos de temperatura ambiente. La mayor temperatura ambiente entre las máximas diarias se registró el 23/09/2023 a las 13:30 horas (en contraste, la menor temperatura entre las mínimas diarias se registró el 04/10/2023 a las 6:30 horas). Por otro lado, las diferencias entre la temperatura máxima y mínima en cada día de medición oscilaron entre 6°C y 13.5°C. Esta última ocurrió el 18/10/2023, día en el cual la temperatura aumentó de 21.4°C a las 6:30 horas a 34.9°C para las 13:30 horas del mismo día. En el Apéndice I se detallan los gráficos de los 52 días de mediciones de la temperatura ambiente cada 30 minutos.

Figura 33

Temperatura ambiente máxima, mínima y su diferencia durante el periodo de medición.

**Tabla 2**

Resumen estadístico de los datos de temperatura ambiente.

Estadísticas generales de los 1040 registros de temperatura ambiente (°C)	
Media	29.38
Mediana	29.10
Moda	29.80
Varianza	13.49
Desviación estándar	3.67

La Figura 34 ilustra los valores máximos y mínimos diarios de radiación solar, así como su diferencia correspondiente. La mayor radiación solar máxima diaria registrada fue de 998 W/m^2 , observada el 06/10/2023 a las 13:00 horas. En contraste, la menor radiación solar máxima diaria fue de 532 W/m^2 , registrada el 08/10/2023 a las 9:30 horas. Este último caso fue inusual, puesto que los picos de radiación solar ocurrieron normalmente entre las 11:00 y las 14:30 horas. La Tabla 3 muestra el resumen estadístico para los valores registrados de radiación solar durante el periodo. Durante todo el periodo de medición, solo se registró un valor de radiación de 0 W/m^2 el 20/10/2023 al inicio de la medición (6:30 horas). Esto probablemente se debió a la lluvia constante que se presentó desde las 00:00 hasta las 9:00 horas de ese día; además el 20/10/2023 se caracterizó

por tener la duración de precipitación diaria más prolongada (aproximadamente 150 minutos, dentro de las horas de medición), ya que en los otros días los eventos de lluvia tuvieron duraciones menores a 90 minutos. En el Apéndice J se detallan las gráficas de los 52 días de mediciones de la radiación solar cada 30 minutos.

Figura 34

Radiación solar máxima, mínima y su diferencia durante el periodo de medición.

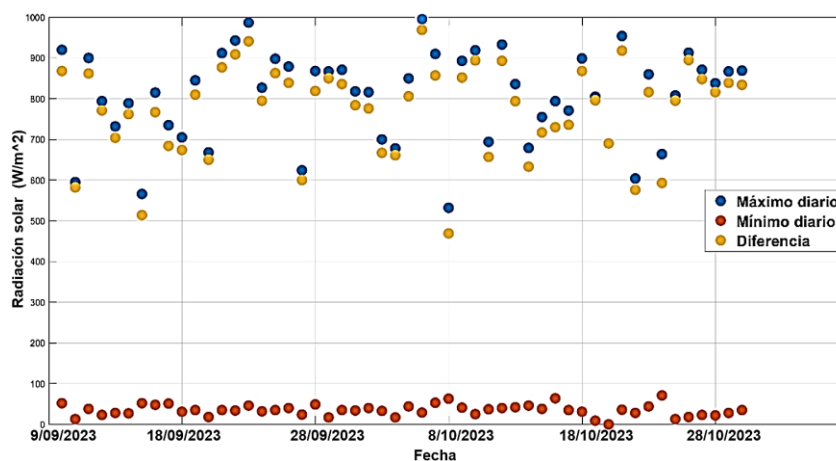


Tabla 3

Resumen estadístico de los datos de radiación solar.

Estadísticas generales de los 1040 registros de radiación solar (W/m^2)	
Media	419.425
Mediana	399.5
Moda	295
Varianza	57740.95
Desviación estándar	240.29

Durante el periodo de estudio la precipitación promedio de los 52 días medidos fue 0.31 mm, con eventos de lluvia en solo 10 días y con duraciones menores a 150 minutos. En total, ocurrieron 21 registros de lluvia, equivalentes al 2% de las 1040 mediciones realizadas. En el Apéndice K se detallan gráficas de las mediciones diarias de precipitación. La Tabla 4 muestra el resumen estadístico de los valores de precipitación medidos durante el periodo. Los bajos niveles

de precipitación durante el estudio se pueden apreciar en la Figura 35, en la cual se presentan los valores de precipitación promedio diaria. El día con mayor precipitación promedio fue el 28/10/2023, con 9.6 mm.

Figura 35

Precipitación promedio diaria durante el periodo de medición.

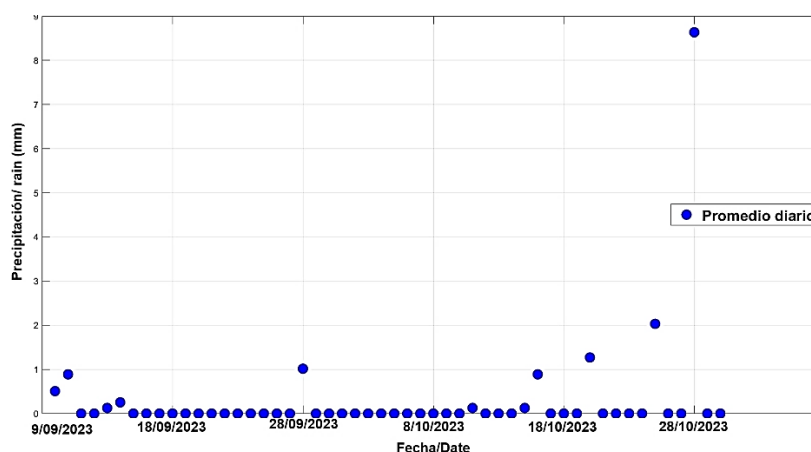


Tabla 4

Resumen estadístico de los datos de precipitación.

Estadísticas generales de los 1040 registros de precipitación (mm)	
Media	0.31
Mediana	0.0
Moda	0.0
Varianza	20.46
Desviación estándar	4.52

La Figura 36 ilustra la velocidad promedio diaria del viento registrada por la estación meteorológica. En el Apéndice L se detallan las gráficas de estas mediciones. La mayor velocidad promedio diaria se registró el 22/09/2023 con 0.8 m/s, y la menor el 20/10/2023 con 0.06 m/s. En este último día las velocidades medidas cada media hora fueron inferiores a 0.4 m/s. La Tabla 5 muestra el resumen estadístico de los datos medidos de velocidad del viento durante el periodo.

Puesto que la viga estaba alineada en dirección S-N, es importante conocer la dirección del viento, además de su velocidad. La Tabla 6 presenta el conteo de las direcciones del viento registradas durante el periodo de estudio. Se destaca un predominio de los vientos provenientes del norte (N), los cuales también registraron las velocidades más altas. Por ejemplo, los vientos provenientes de las direcciones N, NE, NNE, NW y NNW, totalizan un 79.1% de los casos medidos. El resto de las mediciones diarias de la dirección del viento se detallan en el Apéndice G.

Figura 36

Velocidad promedio diaria del viento.

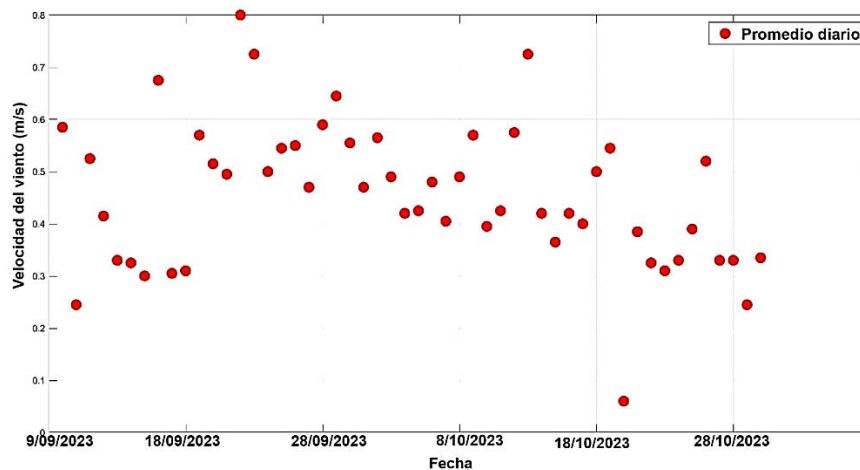


Tabla 5

Resumen estadístico de los datos de precipitación.

Estadísticas generales de los 1040 registros de velocidad del viento (m/s)	
Media	0.45
Mediana	0.40
Moda	0.40
Varianza	0.129
Desviación estándar	0.36

Tabla 6**Variación de la dirección del viento.**

Dirección del viento	Conteo	Dirección del viento	Conteo
ENE	24 (2.4%)	SE	7 (0.7%)
E	18 (1.8%)	SSE	1 (0.1%)
ESE	20 (2%)	SSW	4 (0.4%)
N	549 (52.8%)	SW	19 (1.9%)
NE	32 (3.1%)	W	63 (6.1%)
NNE	83 (8%)	WNW	48 (4.7%)
NNW	95 (9.2%)	WSW	12 (1.2%)
NW	51 (5%)	(Falla de lectura)	10 (1%)
S	4 (0.4%)	Total general	1040

4.1.1. Normalidad de las variables meteorológicas.

Según la prueba de Lilliefors (Romero, 2016), ninguna de las variables meteorológicas se ajustó a una distribución normal, como se aprecia en la Tabla 7. Debido a que se comprobó la no normalidad de los datos, se aplicaron metodologías de análisis de correlación no paramétricas que se detallan más adelante.

Tabla 7

Resultado del test de Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov).

Variable	Temperatura ambiente	Radiación solar	Velocidad del viento	Precipitación
Valor p ($\alpha=0.05$)	≤ 0.001	≤ 0.001	≤ 0.001	≤ 0.001
Normalidad	NO	NO	NO	NO

4.2. Temperatura superficial en la viga-losa.

Como se detalló en la sección 0, la medición de la temperatura superficial del elemento se registró en 10 puntos de la cara ESTE de la viga-losa. Las mediciones se hicieron independientemente con dos cámaras termográficas: una instalada en el VANT y otra portátil. Las especificaciones de ambos dispositivos se detallan en la Sec. 3.1. b de la metodología. Estas mediciones permitieron determinar el comportamiento de la temperatura externa de la viga-losa

mediante la representación y posterior análisis de los perfiles verticales de temperatura superficial. Para la visualización y el análisis de los datos recopilados, se desarrollaron aplicaciones específicas en Matlab®. Todos los perfiles verticales de temperatura superficial externa, obtenidos a partir de ambas cámaras se presentan en Apéndice D y Apéndice E organizados consecutivamente. A continuación, se describen los perfiles de temperatura superficial destacando tendencias generales y por franjas horarias específicas.

4.2.1. Perfiles verticales de temperatura superficial.

A partir de las imágenes térmicas capturadas por el VANT y la cámara portátil, se generaron perfiles verticales de la temperatura superficial en la cara ESTE de la viga-losa en los 10 puntos de interés (Figura 26). Puesto que las mediciones se hicieron cada 30 minutos entre las 6:30 y las 16:00 horas, se obtuvieron 20 perfiles para cada día. A manera de ejemplo se muestran en la Figura 37 y Figura 38 los perfiles obtenidos con el VANT y con la cámara portátil para el día 06/10/2023. En las horas tempranas (6:30 a 8:00 horas), la temperatura superficial es prácticamente constante, con gradientes poco significativos. Esta tendencia cambió de las horas siguientes, mostrando mayores temperaturas en la zona inferior (aleta inferior) y superior (losa) del elemento de concreto. Para el día en cuestión, la temperatura superficial registrada con el VANT osciló entre 22.0°C y 45.0°C, mientras que para la cámara portátil las temperaturas oscilaron entre 22.1°C y 41.3°C. En ambos casos, la máxima temperatura superficial ocurrió en el punto P1 (nivel y= -20mm) pero en diferentes horas, con el VANT, el pico de temperatura (45°C) se alcanzó a las 15:00 horas, mientras que con la cámara portátil el máximo registrado fue de 41.3°C a las 13:00 horas. Estas temperaturas ocurrieron con posterioridad a las horas de la máxima temperatura ambiente de ese día (29.2°C - 10:30 horas) y de la máxima radiación solar (532 W/m² - 9:30 horas). El desfase

temporal evidencia la inercia térmica del concreto, que retiene y sigue absorbiendo calor después de alcanzar el pico de radiación solar. Esto sugiere que, aunque la radiación disminuye luego de alcanzar su pico, la masa del elemento viga-loza continúa acumulando energía térmica, alcanzando sus temperaturas máximas en horas posteriores (IECA, 2018).

Figura 37

Perfiles verticales de temperatura superficial obtenidos con el VANT – 06/10/2023.

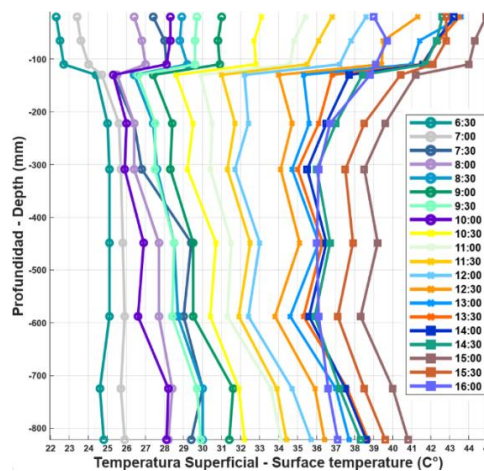
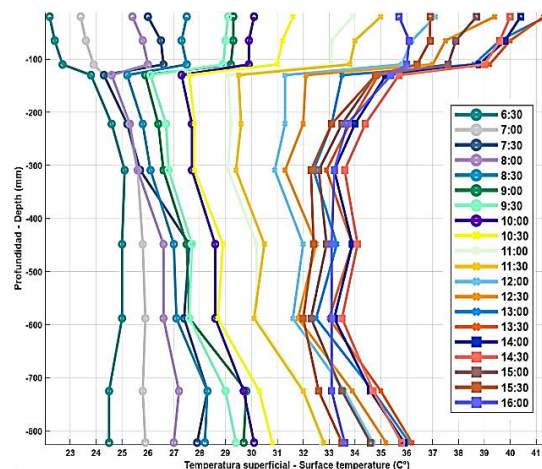


Figura 38

Perfiles verticales de temperatura superficial obtenidos con cámara portátil – 06/10/2023.



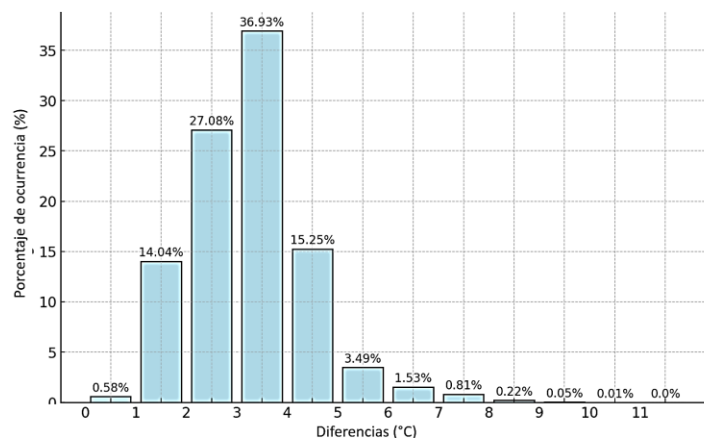
Durante los primeros 90 minutos de medición (6:30 a 8:00 horas), las diferencias entre la temperatura superficial registradas por ambos dispositivos no superaron 1°C . Sin embargo, a lo largo del día, con el aumento de la temperatura ambiente y la radiación solar, las diferencias llegaron hasta 6°C . Esta variación se atribuye a la resolución, sensibilidad y calidad de cada instrumento. El VANT está equipado con sensores térmicos de alta resolución (640x512 píxeles) y sensibilidad (50 mK), que capturan imágenes térmicas en tiempo real a una alta velocidad de 30 Hz desde una posición aérea (DJI, 2020). Esto es especialmente útil para identificar cambios térmicos súbitos en el entorno de manera precisa y rápida. En contraste, la cámara portátil FLIR E6, con una resolución más baja (160x120 píxeles) y frecuencia de captura de 9 Hz, tiene un enfoque más estático y puede tardar más en registrar las fluctuaciones térmicas (Teledyne Flir, 2019). Estas diferencias en la velocidad, sensibilidad y resolución de captura térmica entre el VANT y la cámara portátil explican las discrepancias en las temperaturas registradas, especialmente en las más altas. El VANT puede captar incrementos de temperatura de forma más inmediata y precisa, mientras que la cámara portátil tiende a reflejar un retraso en la detección de los cambios térmicos.

En el Apéndice M se presentan las diferencias calculadas entre los datos de temperatura superficial medidos con el VANT y con cámara portátil, de las cuales se extrae la gráfica de frecuencias de las diferencias mostrada en la Figura 39. La mayoría de las discrepancias (93,3%) entre las mediciones están entre 1°C y 5°C , lo que sugiere que las diferencias entre ambos dispositivos son mayoritariamente significativas (Agüero, 2020). El pico se encuentra en el intervalo de 3°C a 4°C , representando el 36.93% de los datos. Las diferencias menores a 2°C o

mayores a 5°C representan menos del 16% y 7% de los casos, respectivamente, lo que indica que es poco común que ambos dispositivos registren temperaturas similares o altamente distantes.

Figura 39

Distribución de la frecuencia de las diferencias de temperatura entre el VANT y cámara portátil.

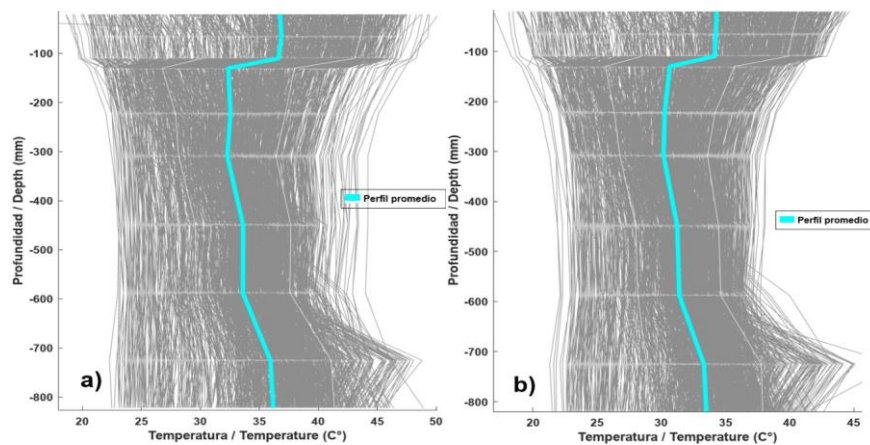


Los conjuntos de perfiles de temperatura superficial obtenidos a partir del VANT (1006 perfiles) y de la cámara portátil (1032 perfiles) se presentan en la Figura 40, incluyendo en cada caso el perfil térmico promedio (línea color cian). El número de perfiles es menor a los 1040 instantes de medición logrados con la estación meteorológica y los termopares, debido a que en ocasiones la lluvia no permitió utilizar las cámaras termográficas o por problemas técnicos de los equipos (desajuste de la imagen, lentitud al encender el equipo, bloqueo sistemático del equipo, entre otros). En la Figura 40 se observa que ambos perfiles promedio muestran un comportamiento positivo, de manera que en la parte superior de la viga-losa (puntos P1, P2 y P3) hay temperaturas mayores que en el alma. A partir del punto P4 ($y = -130$ mm) las temperaturas promedio muestran

una temperatura significativamente menor a la zona de la losa. Este es un comportamiento esperado y es similar al descrito en la guía AASHTO (2012).

Figura 40

Perfiles verticales de temperatura superficial obtenidos del (a) VANT y (b) Cámara portátil.



Como se muestra en la Tabla 8, se registraron un total de 1006 y 1032 datos para cada punto de la cara ESTE de la viga-losa utilizando el VANT y la cámara portátil, respectivamente. En ambos casos se observaron variaciones significativas en las temperaturas superficiales a lo largo del periodo de análisis. El VANT registró la temperatura máxima de 50.2°C y la mínima de 19.6°C , ambas en el punto P1, con una media de 36.79°C y una desviación estándar de 7.06°C en ese mismo punto. La cámara portátil, por su parte, registró un rango más moderado en P1, con una temperatura máxima de 44.7°C y una mínima de 16.9°C , acompañada de una media de 33.31°C y una desviación estándar de 6.13°C .

Tabla 8

Resumen estadístico de los datos de temperatura superficial (valores en °C).

	Punto	Datos	Media	Desviación estándar.	Mediana	Mínimo	Máximo	Primer cuartil.	Tercer cuartil.	Coefficiente de asimetría.	Coefficiente de curtosis
VANT	P1	1006	36.79	7.06	39.50	19.60	50.20	32.20	42.20	-0.69	-0.46
	P2	1006	36.87	6.71	39.60	19.30	49.30	32.70	41.90	-0.77	-0.33
	P3	1006	36.62	6.44	39.40	19.70	49.30	32.80	41.50	-0.79	-0.28
	P4	1006	32.37	5.61	32.70	20.60	47.30	27.60	36.70	0.03	-0.86
	P5	1006	32.55	4.67	33	22	45.10	29	36.10	-0.09	-0.65
	P6	1006	32.29	4.13	32.50	22.50	44.20	29.40	35.20	-0.07	-0.42
	P7	1006	33.62	4.04	34.20	23	44.20	31.40	36.40	-0.54	-0.03
	P8	1006	33.61	3.99	34.30	23	44	31.50	36.30	-0.57	-0.05
	P9	1006	35.94	5.16	36.80	22.30	49.80	33.50	39	-0.47	0.08
	P10	1006	36.19	5.17	37.20	22.50	49.90	33.50	39.70	-0.71	-0.07
Cámara portátil	P1	1032	34.31	6.36	35.70	16.90	44.70	30.18	39.40	-0.67	-0.50
	P2	1032	34.25	5.96	35.65	17.60	43.60	30.80	39.83	-0.77	-0.36
	P3	1032	34.17	5.72	35.60	19.30	42.90	31	39.60	-0.82	-0.29
	P4	1032	30.67	5.04	31.20	19.10	41.20	26.30	34.70	-0.13	-1.01
	P5	1032	30.26	3.94	30.70	20.60	39	27.10	33.30	-0.16	-0.84
	P6	1032	30.18	3.41	30.40	21.30	39.10	27.80	32.70	-0.17	-0.66
	P7	1032	31.24	3.23	31.80	21.90	39.10	29.40	33.50	-0.61	-0.13
	P8	1032	31.40	3.24	31.90	22.10	40	29.80	33.73	-0.64	-0.08
	P9	1032	33.32	4.47	33.90	21.30	49.30	31.30	35.90	-0.31	0.28
	P10	1032	33.52	4.39	34.50	21.50	42.60	31.20	36.60	-0.76	-0.09

Los puntos restantes también mostraron discrepancias notables entre ambos dispositivos. Por ejemplo, en el punto P5, el VANT registró temperaturas entre 22.5°C y 44.2°C, mientras que la cámara portátil registró temperaturas entre 20.4°C y 39.0°C. Estas diferencias en los extremos térmicos, junto con las variaciones en las medias y desviaciones estándar, evidencian las discrepancias en la capacidad de medición entre ambos dispositivos. En cuanto a la distribución de los datos, el coeficiente de asimetría negativo en varios de los puntos indica que las temperaturas tienden a estar más frecuentemente por encima de la media, lo que implica una ligera inclinación hacia valores más altos. En términos del coeficiente de curtosis, los valores negativos en la mayoría de los puntos reflejan una distribución más plana y menos concentrada en los extremos, lo que

sugiere que los datos están menos agrupados alrededor de los valores máximos o mínimos que en una distribución normal.

Para evaluar la normalidad de los datos se aplicó la prueba de Lilliefors, un test estadístico basado en la prueba de Kolmogorov-Smirnov que ajusta para la estimación de los parámetros de la distribución normal (Romero, 2016). Como se muestra en la Tabla 9, los 1006 y 1032 datos correspondientes a cada punto medido no se ajustaron a una distribución normal.

Tabla 9

Resultado del test de Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) para temperaturas superficiales del VANT y cámara portátil.

Punto	VANT		Cámara portátil	
	Valor P ($\alpha=0.05$)	Normalidad	Valor P ($\alpha=0.05$)	Normalidad
P1	≤ 0.001	NO	≤ 0.001	NO
P2	≤ 0.001	NO	≤ 0.001	NO
P3	≤ 0.001	NO	≤ 0.001	NO
P4	≤ 0.001	NO	≤ 0.001	NO
P5	≤ 0.001	NO	≤ 0.001	NO
P6	0.0047	NO	1e-04	NO
P7	≤ 0.001	NO	≤ 0.001	NO
P8	≤ 0.001	NO	≤ 0.001	NO
P9	≤ 0.001	NO	≤ 0.001	NO
P10	≤ 0.001	NO	≤ 0.001	NO

Dado que el perfil térmico promedio de cada instrumento no captura adecuadamente la complejidad del fenómeno, especialmente debido a la considerable variabilidad observada en las mediciones, resulta necesario un análisis más detallado. A continuación, se presentan los perfiles térmicos específicos agrupados por franjas horarias, lo que permite una evaluación más precisa de los patrones térmicos a lo largo del día.

4.2.2. Perfiles verticales de temperatura superficial por franjas horarias.

Se definieron cuatro franjas horarias de dos horas y media cada una, como se especifica en la Tabla 1 (en la Sec. 0). La Figura 41 muestra todos los perfiles verticales obtenidos por el VANT separados por franjas horarias, mientras que la Figura 42 muestra los respectivos perfiles obtenidos con la cámara portátil. Todas las gráficas resaltan el perfil promedio (línea cian) correspondiente en cada franja horaria. A continuación se describen algunas tendencias por franja.

Franja 1 (6:30 - 8:30): tanto en la Figura 41a (VANT) como en la Figura 42a (cámara portátil), los perfiles muestran temperaturas más bajas en parte superior (losa), con la mayoría de los valores concentrándose entre 25°C y 30°C. En ambos casos, la temperatura promedio a partir del punto P4 ($y = -130$ mm) incrementa gradualmente con la profundidad, con menor variabilidad entre los perfiles en la zona del alma. Los perfiles medidos por el VANT en esta franja presentan temperaturas ligeramente mayores (hasta 45.8°C) en comparación con los de la cámara portátil (hasta 42.5°C). Esto sugiere que el VANT capturó un calentamiento inicial más intenso, aunque ambos métodos reflejan un proceso de acumulación lenta de calor a lo largo de las primeras horas de la mañana. En ambos casos se observa que las temperaturas más elevadas se registraron en la parte inferior de la viga-losa, entre los 600 y 800 mm de profundidad. Este comportamiento puede explicarse por la incidencia de los primeros rayos solares durante las horas tempranas del día, los cuales alcanzan directamente esta sección de la estructura (llegan a la viga-losa en ángulos menores a 25° para esta franja horaria). Además, debido a la inclinación solar en ese momento, se genera una sombra sobre el alma de la losa, lo que reduce la radiación en otras áreas y concentra el calor en la parte inferior de la viga.

Franja 2 (9:00 - 11:00): se observa un comportamiento térmico relativamente estable entre los 130 mm y los 600 mm de profundidad, con variaciones mínimas de temperatura y perfiles que muestran líneas prácticamente verticales en esta sección. Sin embargo, a partir de los 600 mm de profundidad, correspondientes a la zona de la aleta inferior, la temperatura aumenta notablemente. Este patrón térmico puede atribuirse al ángulo de incidencia de los rayos solares en esta franja horaria, donde la luz solar impacta de manera oblicua (entre 35° y 65° aproximadamente), favoreciendo el calentamiento de la parte inferior del elemento.

Ambos instrumentos registraron un incremento de temperatura superficial en esta franja, con valores que oscilan entre 30°C y 40°C. Los perfiles promedio, representados por la línea cian en las Figura 41b y Figura 42b, reflejan de manera similar este aumento en la temperatura, sugiriendo un calentamiento diurno consistente. Sin embargo, existen diferencias en la variabilidad de los perfiles capturados: los datos obtenidos con el VANT muestran una mayor dispersión en profundidad, mientras que los perfiles registrados por la cámara portátil están más agrupados.

En la franja 3 (11:30 - 13:30): se observa un comportamiento térmico caracterizado por temperaturas altas en la superficie de la losa, con valores entre 35°C y 45°C, como se muestra en las Figura 41c y Figura 42c. Tras pasar la losa, la temperatura disminuye y se mantiene aproximadamente constante entre los 200 mm y 600 mm de profundidad. Sin embargo, después de los 600 mm, en la zona inferior de la viga-losa, se percibe un ligero aumento de temperatura.

Los perfiles térmicos que se muestran en la franja 3 son menos pronunciados y presentan una menor dispersión en comparación con las franjas anteriores. Esto puede estar relacionado con la estabilidad de la radiación solar durante este periodo, en el cual las variaciones tienden a ser menores en comparación con las primeras horas de la mañana. Además, el ángulo de incidencia de

los rayos solares en esta franja se encuentra entre 65° y 85° aproximadamente, por lo que la losa recibe radiación directa, y además después de los 200 mm de profundidad el alma y la aleta inferior de la viga se encuentra mayormente en sombra.

En la franja 4 (14:00 - 16:00): la temperatura varía poco a lo largo del perfil. Debajo de la losa, los perfiles muestran temperaturas inferiores a las de la losa, con una distribución que tiende a ser aproximadamente lineal (Figura 41d y Figura 42d).

En esta franja horaria, ambos instrumentos reflejan una leve disminución de temperaturas, manteniéndose sin embargo en valores relativamente elevados, alrededor de 35°C . Las líneas promedio siguen una tendencia descendente, indicando el inicio de la disipación de calor superficial al aproximarse el final del día. Se aprecia mayor variabilidad entre los perfiles captados con el VANT (Figura 41d), en comparación con los de la cámara portátil (Figura 42d), cuyos perfiles son más consistentes y agrupados. Esto está relacionado con la mayor cobertura y resolución espacial del VANT, que permite abarcar áreas más amplias y, en consecuencia, muestra mayor dispersión en los perfiles obtenidos.

Figura 41

Perfiles verticales de temperatura – VANT (a) franja 1, (b) franja 2, (c) franja 3 y (d) franja 4.

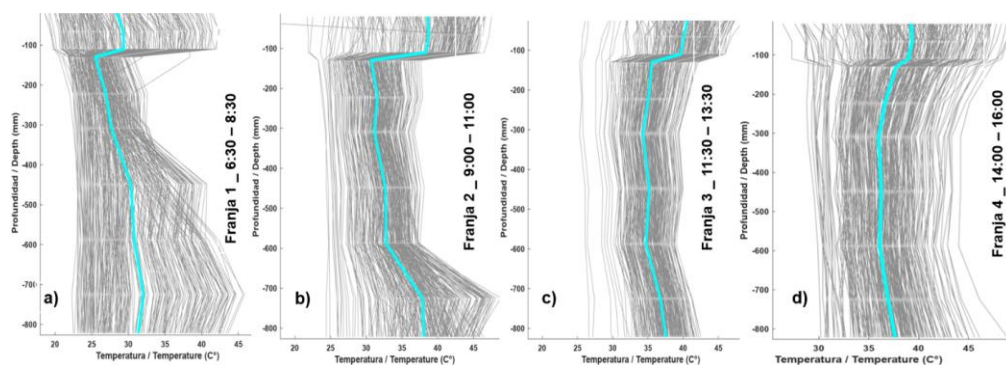
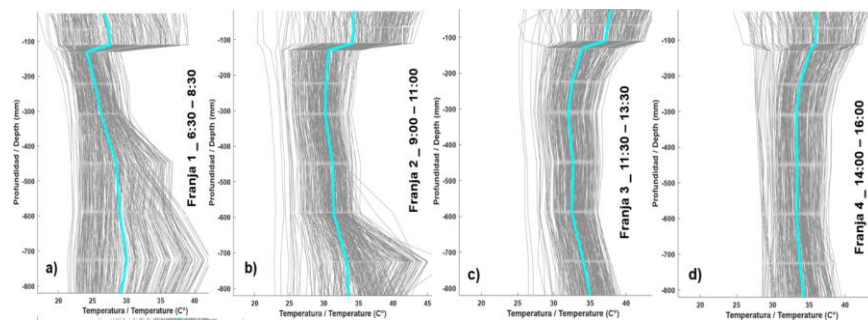


Figura 42

Perfiles verticales de temperatura – cámara portátil (a) franja 1, (b) franja 2, (c) franja 3 y (d) franja 4.



Por separado, los perfiles promedio en cada franja horaria y para ambos dispositivos mostraron tendencias positivas similares, con una diferencia promedio general de $\pm 2.2^{\circ}\text{C}$, donde la cámara portátil tiende a registrar valores generalmente menores a los registrados por el VANT.

4.2.3. Tendencia horaria de la temperatura superficial

A lo largo de cada medición de la temperatura superficial de la viga-losa de concreto se observaron fluctuaciones en el comportamiento térmico externo. En la Tabla 10 se resume la tendencia promedio de la temperatura superficial registrada con ambas cámaras térmicas. Desde las 6:30 hasta aproximadamente las 13:30 horas, se evidencia un aumento constante en la temperatura mínima, máxima y promedio del elemento (indicada con la flecha azul), captado de forma similar por ambos dispositivos. No obstante, a partir de las 14:00 horas se perciben algunas diferencias en el comportamiento registrado por los dispositivos (en el intervalo de 13:30 a 14:30), seguido de una disminución gradual en las temperaturas superficiales hasta las 16:00 horas (flecha roja).

Este patrón coincide con las variaciones de la temperatura ambiente, como se muestra en la Figura 43. En el extracto de esta figura se observa un comportamiento típico en el que, en un mismo

día, pueden presentarse varios picos de temperatura ambiente (indicados con flechas amarillas para los picos máximos y rojas para los picos locales). Estas fluctuaciones vespertinas se relacionan con condiciones meteorológicas específicas de la zona de estudio, como el aumento de la velocidad del viento después del mediodía y la frecuente presencia de nubosidad posterior a las 14:00 horas, las cuales contribuyen a la modulación de la temperatura superficial de la estructura.

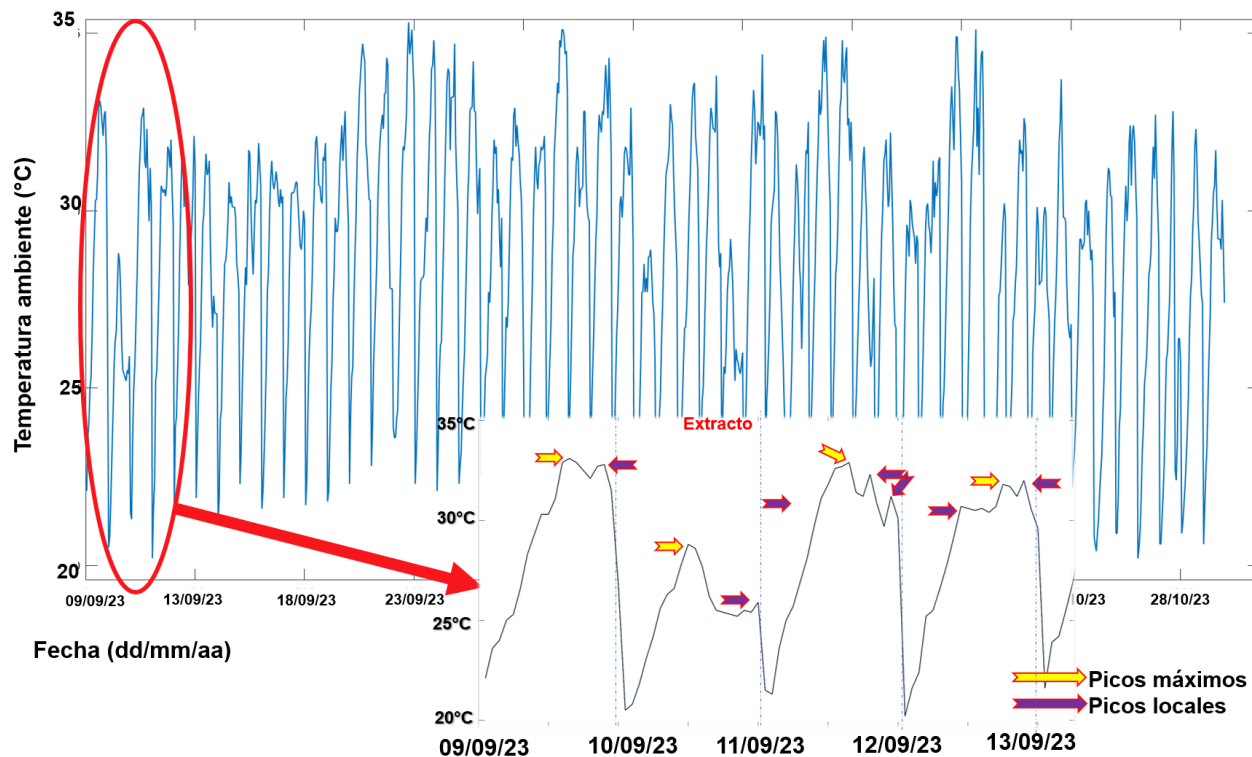
Tabla**10**

Tendencia general y valores máximos, mínimos y promedio de la temperatura superficial de la viga-losa.

Hora perfil	Tendencia general		Temperatura máxima (°C)		Temperatura mínima (°C)		Temperatura promedio (°C)	
	Dron	Cámara portátil	VANT	Cámara portátil	VANT	Cámara portátil	VANT	Cámara portátil
6:30			32	29.6	19.6	19.1	24.9	23.8
7:00			36	32.3	19.6	16.9	26.8	25.3
7:30			40.1	36.5	20.9	20.3	29.6	27.7
8:00			43.7	39.7	22.5	20.5	31.4	29.5
8:30			45.8	42.5	23.5	21	33.1	30.8
9:00			47.8	44.9	21.7	21.1	33.9	31.9
9:30			49.8	49.3	22.1	20.4	34.8	32.6
10:00			46.5	43.1	23.6	23.5	35.2	32.9
10:30			47.5	44.4	24.4	23.8	35.5	33.3
11:00			46.7	43.9	24.8	24.3	35.9	33.8
11:30			46.9	44.1	25.3	25.2	36.2	34.1
12:00			47.5	44.7	25.6	25.6	36.6	34.3
12:30			46.7	43.2	27.6	26.8	37.1	34.5
13:00			49.7	44.4	29.1	27.2	37.3	34.8
13:30			47.3	44.2	29.8	25.1	37.6	34.9
14:00			46.9	43.3	26.4	24.5	37.3	34.8
14:30			47.1	43.2	29.4	26.4	37.6	34.9
15:00			50.2	42.4	27.6	26	39.0	34.6
15:30			49.3	42	29.2	26	37.6	34.4
16:00			49.9	41.2	29.4	26.4	37.2	33.7

Figura 43

Variación en el tiempo de la temperatura ambiente durante el periodo de medición.



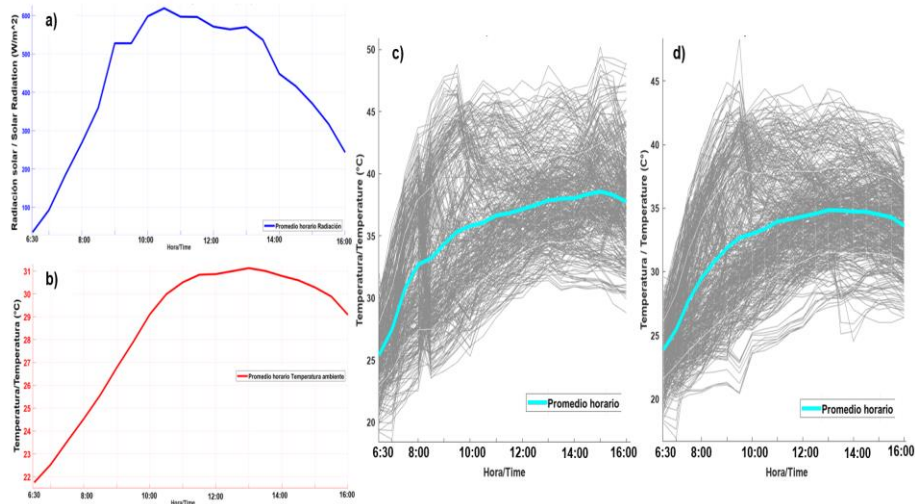
4.2.4. Series de tiempo diarias de la temperatura superficial.

Para constatar la asociación entre la temperatura superficial y algunas variables meteorológicas, en la Figura 44 se muestra el comportamiento de la radiación solar promedio diaria (Figura 44a) medida durante el periodo de estudio, la temperatura ambiente promedio diaria (Figura 44b) y las series de tiempo de las 1006 y 1032 mediciones para el VANT (Figura 44c) y la cámara portátil (Figura 44d), respectivamente. Para la radiación solar y la temperatura ambiente, se calcularon los respectivos promedios en cada intervalo de medición (intervalos de 30 minutos desde las 6:30 hasta las 16:00 horas). Al observar las líneas promedio, se nota que las temperaturas

superficiales tienen una tendencia similar a la de las dos variables meteorológicas, que son la más influyentes en el fenómeno de transferencia de calor en el concreto.

Figura 44

Series de tiempo promedio horario de (a) radiación solar, (b) temperatura ambiente, (c) temperatura superficial – VANT y (d) temperatura superficial – cámara portátil.

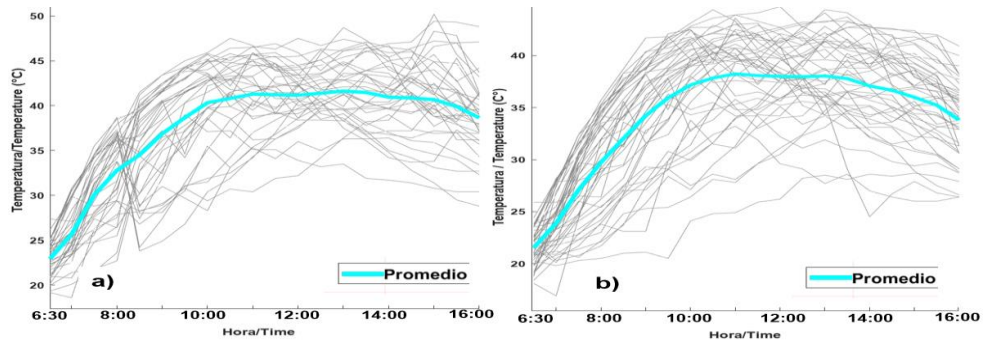


A partir de las representaciones de las series de tiempo de la temperatura superficial medidas con el VANT (Figura 45a a Figura 54a) y la cámara portátil (Figura 45b a Figura 54b) en cada punto (P1 a P10) se puede observar lo siguiente:

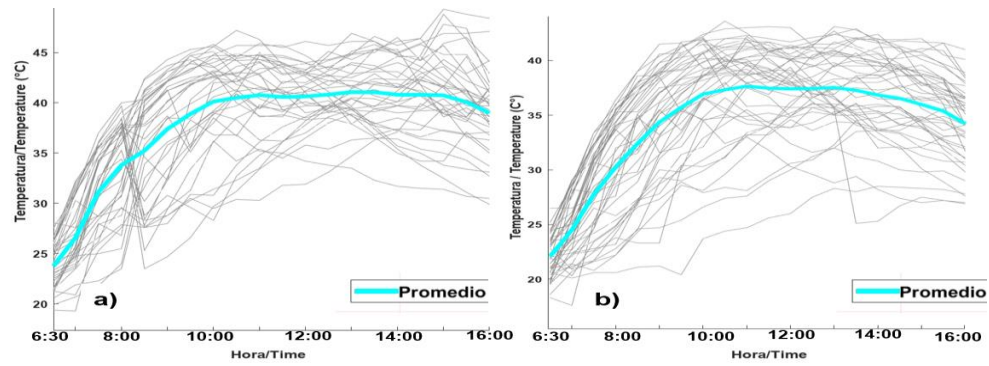
Para los puntos P1, P2 y P3, ubicados en la losa, las series de tiempo de la temperatura superficial con ambos dispositivos (Figura 45, Figura 46 y Figura 47) tienen comportamientos similares y sin variaciones abruptas. La línea promedio en las gráficas revela que la temperatura aumenta hasta aproximadamente las 11:00 horas, se mantiene relativamente quasi-constante hasta las 14:00 horas, y luego decrece. En estos tres puntos, el comportamiento de la temperatura superficial es similar al patrón típico de la temperatura ambiente promedio (Figura 44b), con variaciones suaves.

Figura 45

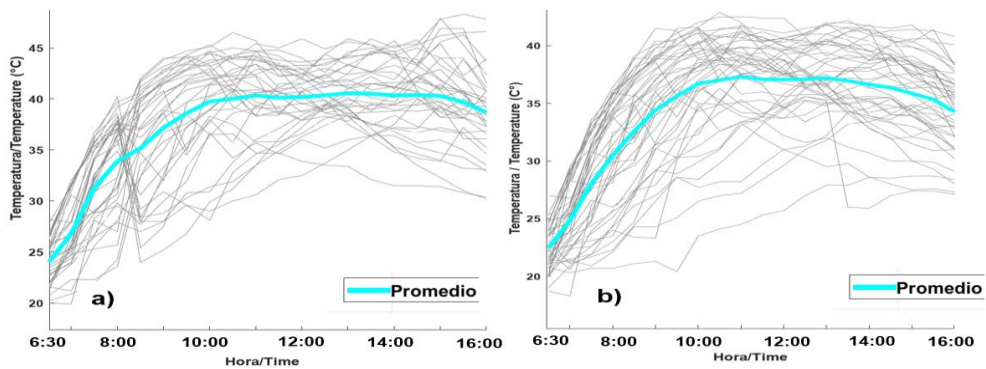
Series de tiempo punto P1 con (a) VANT y (b) cámara portátil.

**Figura 46**

Series de tiempo punto P2 con (a) VANT y (b) cámara portátil.

**Figura 47**

Series de tiempo punto P3 con (a) VANT y (b) cámara portátil.



Para los puntos P4, P5 y P6, que están ubicados en la zona del alma de la viga-losa, las gráficas de las series de temperatura superficial presentan un aumento de temperatura (inclinación) más leve en comparación con los puntos sobre la losa. Esto se evidencia en las Figura 48, Figura 49 y Figura 50, respectivamente. Además, las series de tiempo en estos puntos muestran una menor dispersión, especialmente en la primera mitad del día. Este comportamiento indica una transferencia de calor más gradual, sin las fluctuaciones marcadas observadas en los otros puntos, que puede estar influenciada por la sombra que genera la losa en esta zona y la menor incidencia de radiación directa.

Figura 48

Series de tiempo punto P4 con (a) VANT y (b) cámara portátil.

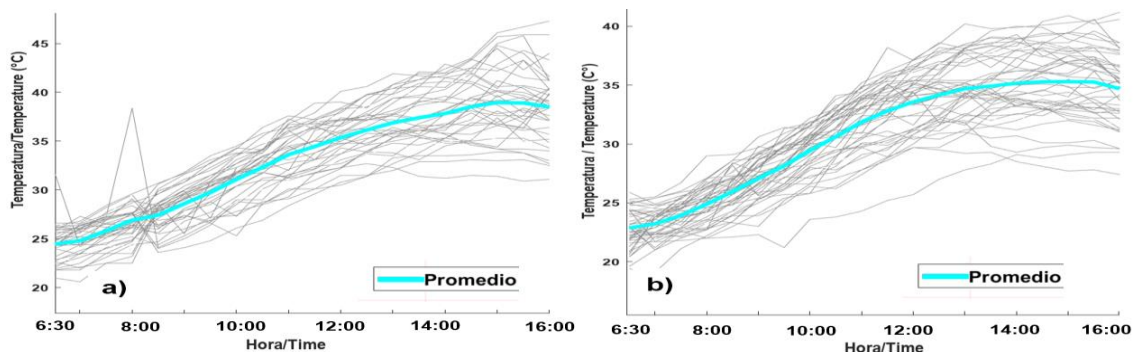


Figura 49

Series de tiempo punto P5 con (a) VANT y (b) cámara portátil.

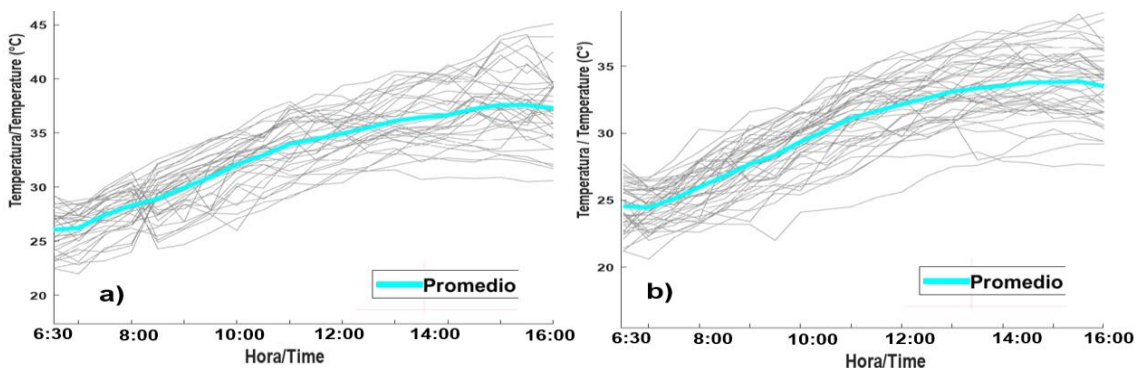
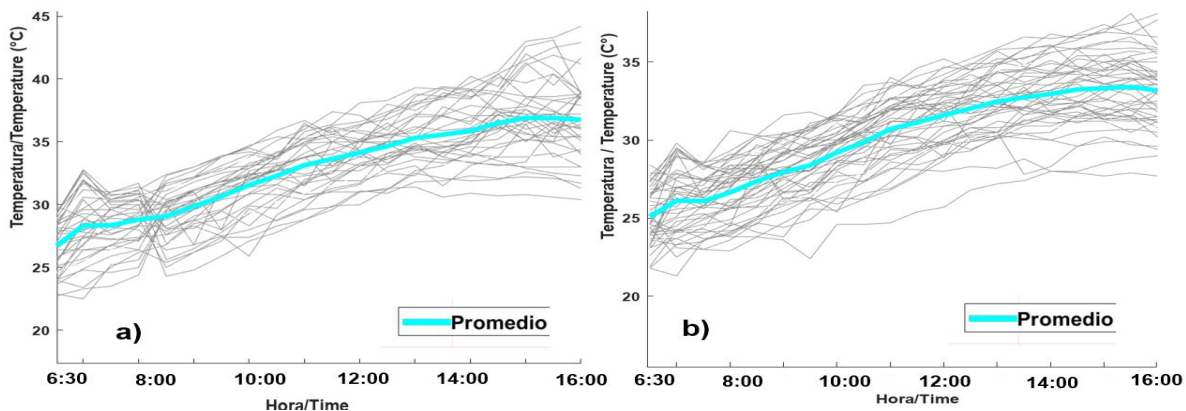


Figura 50

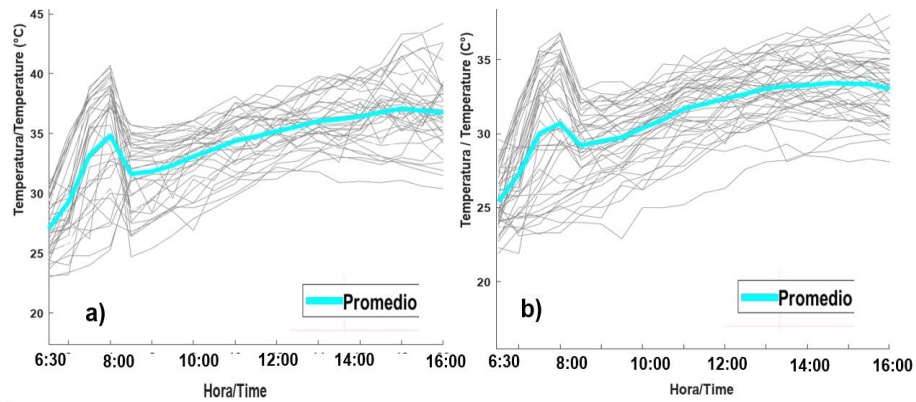
Series de tiempo punto P6 con (a) VANT y (b) cámara portátil.



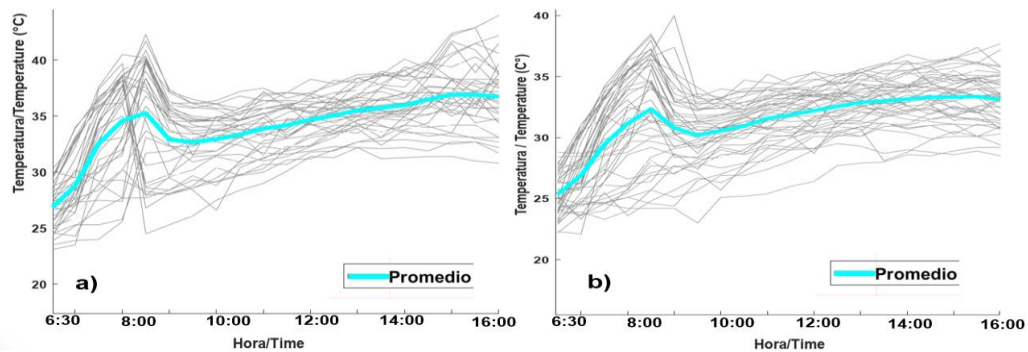
Para los puntos P7 y P8 ubicados en la zona de la aleta inferior de la viga-losa, las series de tiempo de temperatura superficial (Figura 51 y Figura 52) presentan un aumento significativo entre las 6:30 y las 8:00 horas aproximadamente. Estas muestran un marcado incremento, alcanzando un máximo alrededor de las 8:00 horas. Posteriormente la temperatura en dichos puntos decae y luego, a partir de las 9:00 horas, la temperatura aumenta gradualmente hasta estabilizarse. En contraste, en los puntos P9 y P10 (Figura 53 y Figura 54), el pico de temperatura es más pronunciado y ocurre entre las 9:00 y las 9:30 horas. Después de alcanzar el máximo, la temperatura desciende ligeramente y se estabiliza en una línea prácticamente horizontal, mostrando escasas variaciones después de las 10:00 horas. Este patrón sugiere que en los puntos P7 y P8 ocurre un incremento inicial de temperatura en las primeras dos horas de medición, cuando reciben radiación directa, que luego se modera gradualmente. En contraste, en los puntos P9 y P10, la ganancia de temperatura es más pronunciada durante las primeras tres horas de medición con exposición directa, seguido de una estabilización casi completa. Esta diferencia está asociada a la variada exposición y efectos de la radiación solar en cada punto.

Figura 51

Series de tiempo punto P7 con (a) VANT y (b) cámara portátil.

**Figura 52**

Series de tiempo punto P8 con (a) VANT y (b) cámara portátil.

**Figura 53**

Series de tiempo punto P9 con (a) VANT y (b) cámara portátil.

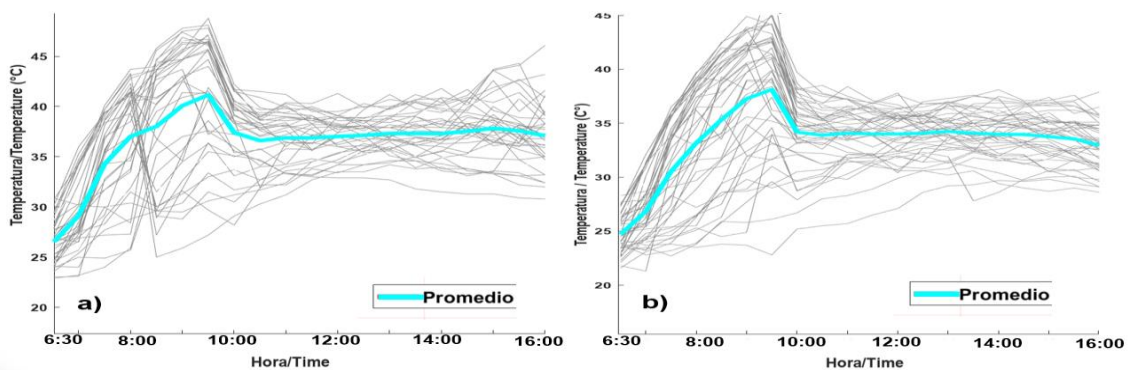
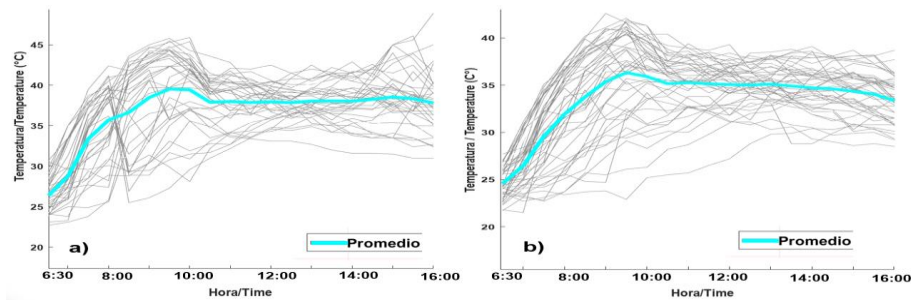


Figura 54

Series de tiempo punto P10 con (a) VANT y (b) cámara portátil.



4.3. Temperatura interna en la viga-losa.

La temperatura interna del espécimen viga-losa se midió utilizando los termopares embebidos en la línea vertical central de la viga y la losa. Las especificaciones y ubicación de los termopares se detallan en la sec. 0. Estas mediciones permitieron determinar y analizar los perfiles verticales de temperatura interna, empleando aplicaciones específicas desarrolladas en Matlab®. Los perfiles de temperatura interna obtenidos para el periodo de medición y organizados secuencialmente se presentan en el Apéndice F. A continuación, se detallan los perfiles internos, las tendencias generales por franjas horarias, un resumen estadístico, y la temperatura interna mínima, que es clave para determinar el gradiente térmico vertical. Además, se incluye una descripción del análisis de perfiles térmicos para varios días representativos.

Perfiles verticales de temperatura interna.

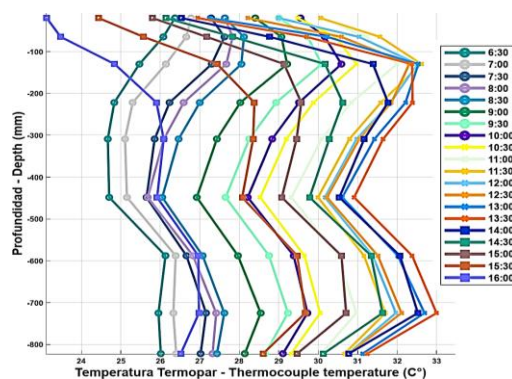
A partir de las lecturas realizadas por los termopares, se generaron perfiles verticales de la temperatura interna en la línea central conformada por nueve puntos de medición (P1 a P9 en la Figura 30). Para cada día se obtuvieron 20 perfiles que describen el comportamiento diario de la temperatura interna. A manera de ejemplo, se muestra en la Figura 55 los perfiles de temperatura interna para el día 06/10/2023. En este día, la temperatura interna osciló entre 23°C y 33°C. Se

observa que la temperatura interna aumentó gradualmente desde las 6:30 horas en todos los puntos de medición, alcanzando el pico alrededor de las 13:30 horas. Posteriormente, comenzó a descender de manera gradual hasta las 16:00 horas. Cabe destacar que en el termopar del punto P1 (a 20 mm de profundidad), el descenso de temperatura fue más abrupto en comparación con los otros puntos.

Para ese día, el comportamiento de la temperatura interna estuvo fuertemente influenciado por la radiación solar, que alcanzó su máximo alrededor de las 13:00 horas. La sincronía entre este pico de radiación y el posterior descenso de la temperatura interna sugiere que la radiación solar es un factor determinante en la transferencia de calor dentro de la viga-losa de concreto. Este efecto se examina con mayor detalle. Además, la variación de la temperatura interna en respuesta a la radiación solar demuestra la capacidad del concreto para almacenar y liberar calor, afectando su temperatura interna a lo largo del día. Este fenómeno es especialmente importante en días con alta radiación solar, donde las fluctuaciones térmicas pueden ser más pronunciadas. Estos efectos se detallarán más adelante en la sección 4.5 (pág. 126 - 127), haciendo hincapié en sus condiciones meteorológicas extremas, tales como radiación solar máxima, temperaturas ambientales elevadas, velocidades de viento máximas y eventos de precipitación prologados.

Figura 55

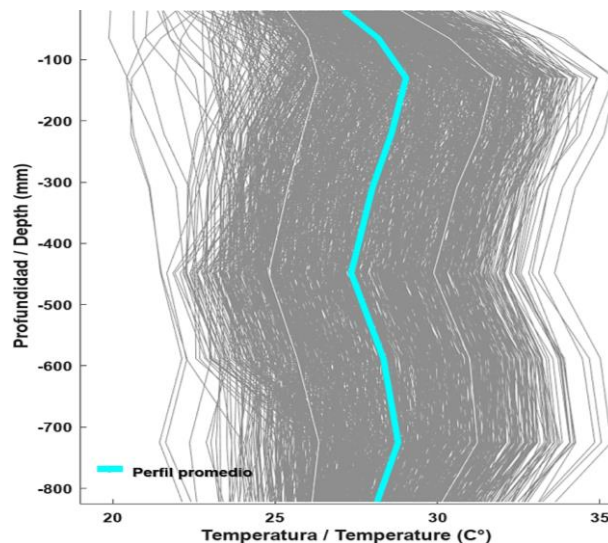
Perfiles verticales de temperatura interna - 06/10/2023.



En la Figura 56 se muestran todos los perfiles de temperatura interna, junto con un perfil promedio (en color cian) de las 1040 mediciones. Analizando el perfil promedio desde la superficie hacia abajo, se observa un gradiente térmico que varía con la profundidad: en los primeros 200 mm se registra un incremento de temperatura conforme aumenta la profundidad, seguido de una disminución hacia la zona media (aproximadamente a 450 mm). Posteriormente, la temperatura incrementa hasta alcanzar los 700 mm, para finalmente mostrar un leve descenso en la zona más profunda. La temperatura interna osciló entre 19.8°C y 35.5°C , con una diferencia de 15.6°C .

Figura 56

Perfiles verticales de temperatura interna.



Puesto que se obtuvieron 1040 registros de temperatura interna a partir de los termopares, cada uno de los nueve puntos monitoreados en la línea central vertical de la viga-losa tiene asignados 1040 datos. El resumen de los datos de cada punto se presenta en la Tabla 11. Durante el periodo de análisis, la medición de la temperatura interna fue ininterrumpida, lo que permitió capturar la dinámica completa de las fluctuaciones de temperatura. Se observa de la Tabla 11 que

la menor temperatura interna registrada fue de 19.89°C y la mayor de 35.54°C. Los valores extremos de temperatura se registraron específicamente en los puntos P2 y P3, ubicados en la región central de la losa. Esta variabilidad se puede atribuir a la ubicación de estos puntos en la región central de la losa, que está más expuesta a las fluctuaciones térmicas ambientales debido a la radiación solar directa durante el día y al enfriamiento radiativo durante las primeras horas de la mañana. Adicionalmente, su proximidad a la superficie exterior los hace más susceptibles a los cambios en la temperatura del aire circundante.

Tabla

11

Resumen estadístico de los datos de temperatura interna (valores en °C).

Punto	Datos	Media.	Desviación estándar.	Mediana	Mínimo.	Máximo.	Primer cuartil.	Tercer cuartil.	Coefficiente de asimetría.	Coefficiente de curtosis
P1	1040	27,13	1,77	27,26	19,93	31,98	26,08	28,27	-0,4	0,61
P2	1040	28,18	2,19	28,2	19,89	33,89	26,73	29,78	-0,32	0,08
P3	1040	29,04	2,71	29,13	20,43	35,54	27,04	31,18	-0,18	-0,57
P4	1040	28,58	2,74	28,67	20,56	35,14	26,52	30,84	-0,12	-0,83
P5	1040	28	2,61	28,04	21,12	34,26	25,83	30,16	-0,06	-0,95
P6	1040	27,35	2,55	27,39	21,48	33,61	25,25	29,4	-0,02	-0,96
P7	1040	28,34	2,66	28,33	22,14	35,02	26,18	30,47	0,02	-0,92
P8	1040	28,8	2,45	28,76	21,45	35,36	26,91	30,68	0,03	-0,65
P9	1040	28,15	2,01	28,12	22,14	33,64	26,66	29,55	0,07	-0,49

Los resultados de la prueba de Lilliefors para evaluar la distribución normal de la temperatura interna se muestran en la Tabla 12. Se encontró que los 1040 datos de cada uno de los puntos medidos con los termopares no se ajustan a una distribución normal. Una vez confirmada la no normalidad de los datos, fue necesario aplicar metodologías de análisis de correlación no paramétricas.

Tabla**12**

Resultado del test de Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) para temperatura interna.

Punto	Valor P ($\alpha=0.05$)	Normalidad
P1	9e-04	NO
P2	0,0056	NO
P3	1e-04	NO
P4	≤ 0.001	NO
P5	≤ 0.001	NO
P6	≤ 0.001	NO
P7	≤ 0.001	NO
P8	≤ 0.001	NO
P9	≤ 0.001	NO

Perfiles verticales de temperatura interna por franjas horarias.

Este análisis se realizó con las franjas horarias definidas anteriormente, como se especifican en la Tabla 1 (pg. 64). Las Figura 57a a Figura 57d muestran los perfiles verticales obtenidos a partir de la medición con los termopares durante las franjas horarias 1 a 4, respectivamente. En todas las franjas, los perfiles verticales de temperatura interna muestran un comportamiento similar al descrito previamente para el perfil promedio térmico de todos los perfiles, sin embargo se destaca lo siguiente:

Franja 1 (6:30 - 8:30): el perfil promedio muestra temperaturas ligeramente inferiores (entre 3°C y 4°C) al perfil total, especialmente en la zona superior (100 mm a 300 mm). Mantiene una forma similar, pero con un desplazamiento general hacia temperaturas más bajas, lo cual es consistente con las horas tempranas del día y una dispersión más estrecha, con una variabilidad de $\pm 2^\circ\text{C}$ respecto al promedio en la franja. Las temperaturas oscilan entre 21.7°C y 31.2°C (variación térmica total de 9.5°C), reflejando el período más fresco del día.

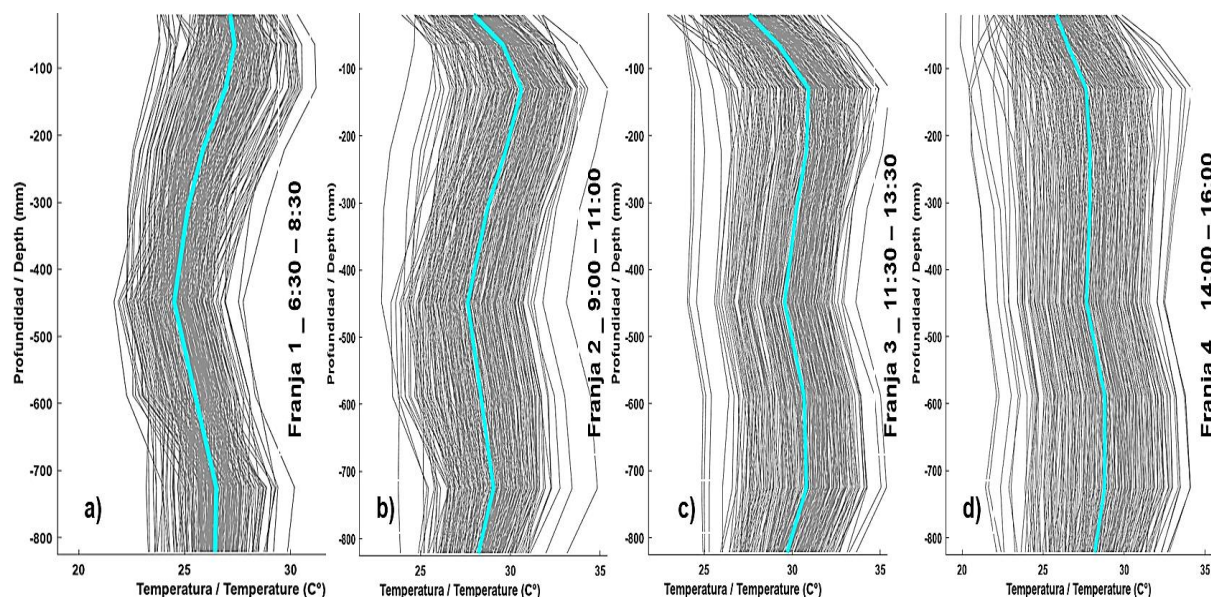
Franja 2 (9:00 - 11:30): el perfil promedio presenta un ligero incremento en las temperaturas (entre 2°C y 3°C) respecto al perfil total. Se observa una mayor variabilidad en los perfiles individuales, especialmente en la zona del alma (300 a 500 mm) con una dispersión de hasta $\pm 3^\circ\text{C}$. La forma general se mantiene, pero con temperaturas más elevadas. El rango de temperaturas se amplía a 12.6°C (variando entre 22.8°C y 35.4°C).

Franja 3 (11:30 - 13:30): corresponde al período más cálido, con temperaturas ligeramente superiores (entre 3°C y 4°C) al perfil total, con una amplitud térmica de 12.6°C (variando entre 22.9°C y 35.5°C). La forma del perfil promedio es similar a la del perfil total, pero desplazada hacia temperaturas más altas, alcanzando una dispersión máxima de $\pm 3.5^\circ\text{C}$.

Franja 4 (14:00 - 16:00): el perfil promedio presenta valores más cercanos al perfil total, con un rango térmico de 14.3°C (entre 19.9°C y 34.2°C), el más amplio de todas las franjas. La temperatura promedio desciende de 1°C a 2°C respecto a la franja 3 y la dispersión de los perfiles se reduce a $\pm 2.5^\circ\text{C}$. Las variaciones respecto al perfil total son menos pronunciadas que en las franjas anteriores y se observa mayor uniformidad en la zona del alma (400 mm a 600 mm), con variaciones menores a 1°C.

Figura 57

Perfiles verticales de temperatura interna para (a) franja 1, (b) franja 2, (c) franja 3 y (d) franja 4.




Tendencia horaria de la temperatura interna.

Al igual que con la temperatura externa, la temperatura interna máxima, mínima y promedio de la viga-loso presentó fluctuaciones a lo largo de cada día de medición. La Tabla 13 resume la tendencia general promedio de la temperatura interna basada en las 1040 mediciones realizadas por los termopares. Allí se observa que la temperatura interna aumenta desde las 6:30 hasta las 11:30 horas, para luego descender hasta las 16:00 horas. Este patrón está influenciado principalmente por la radiación solar. En la Figura 58 se muestra el comportamiento típico de la radiación solar de algunos días del estudio. En esta se observa que tras alcanzar el pico de radiación entre las 9:30 y 14:00 horas, la radiación disminuye gradualmente, aunque en ocasiones se registran aumentos

abruptos. La variabilidad de la radiación solar también obedecía al aumento de la nubosidad que ocurría con frecuencia después de las 14:00 horas.

Tabla**13**

Tendencia general promedio de la temperatura interna.

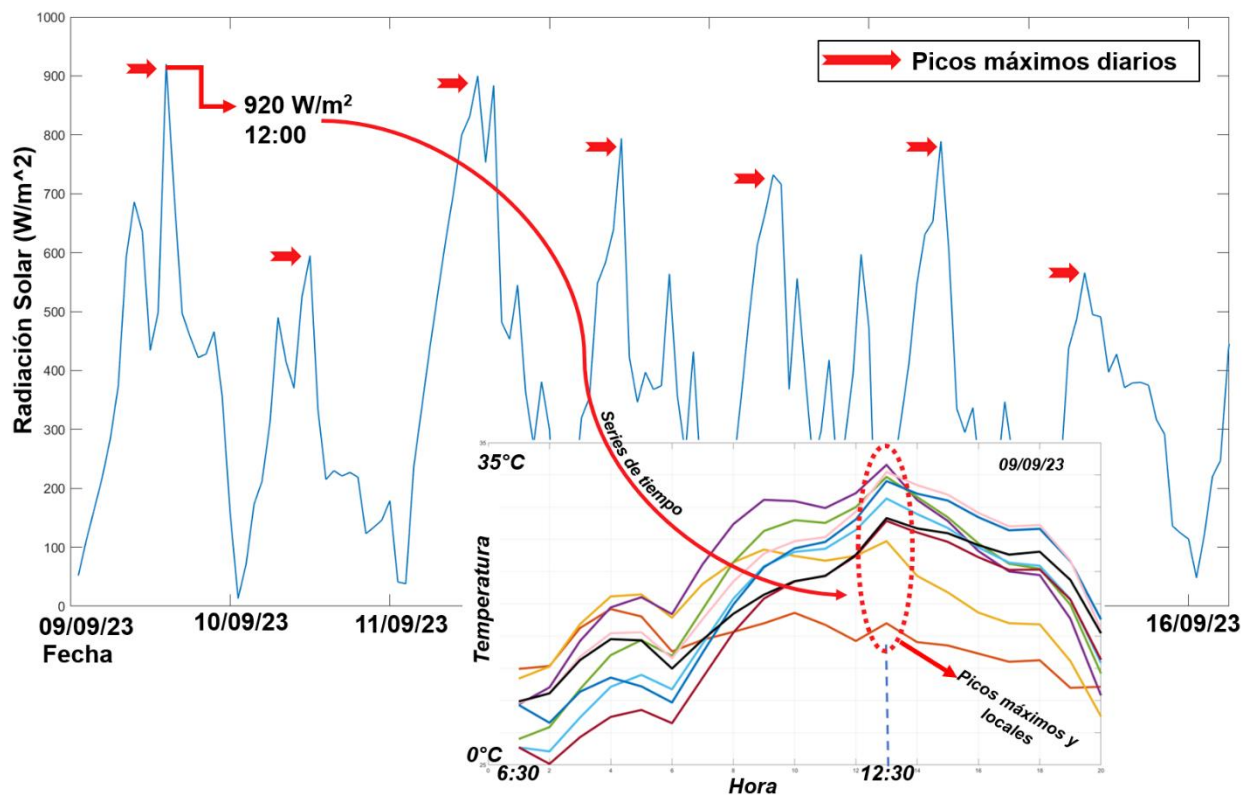
Hora perfil	Tendencia general	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura promedio (°C)
6:30		29.7	23.0	25.7
7:00		29.2	22.3	25.8
7:30		29.4	22.2	26.0
8:00		30.3	21.7	26.3
8:30		31.2	22.5	26.9
9:00		32.2	22.8	27.5
9:30		33.1	23.9	29.2
10:00		33.3	24.6	29.0
10:30		34.3	24.7	29.7
11:00		35.4	24.7	30.1
11:30		35.5	24.8	30.4
12:00		34.5	24.1	30.3
12:30		35	23.3	30.0
13:00		34.2	23.0	29.7
13:30		34.9	22.9	29.4
14:00		34.2	22.5	29.9
14:30	34.1	22.3	29.3	
15:00	34.1	21.0	27.7	
15:30	33.5	19.9	27.1	
16:00	31.5	20.6	26.4	

El 51.9% de los días de medición presentaron el pico de radiación solar entre las 9:30 y las 11:30 horas, mientras que el 49.1% entre las 12:00 y 14:00 horas. Debido a las características de transferencia de temperatura del concreto, los cambios en las condiciones meteorológicas impactaban la temperatura interna del concreto de forma retardada. Por ejemplo, el 09/09/2023, el

pico de radiación solar se registró a las 12:00 horas (Figura 58), mientras que a las 12:30 horas se registraron picos máximos y locales de temperatura interna en los diferentes puntos de medición.

Figura 58

Tendencia típica de la radiación solar durante la medición y series de tiempo de la temperatura interna para 09/09/2023.



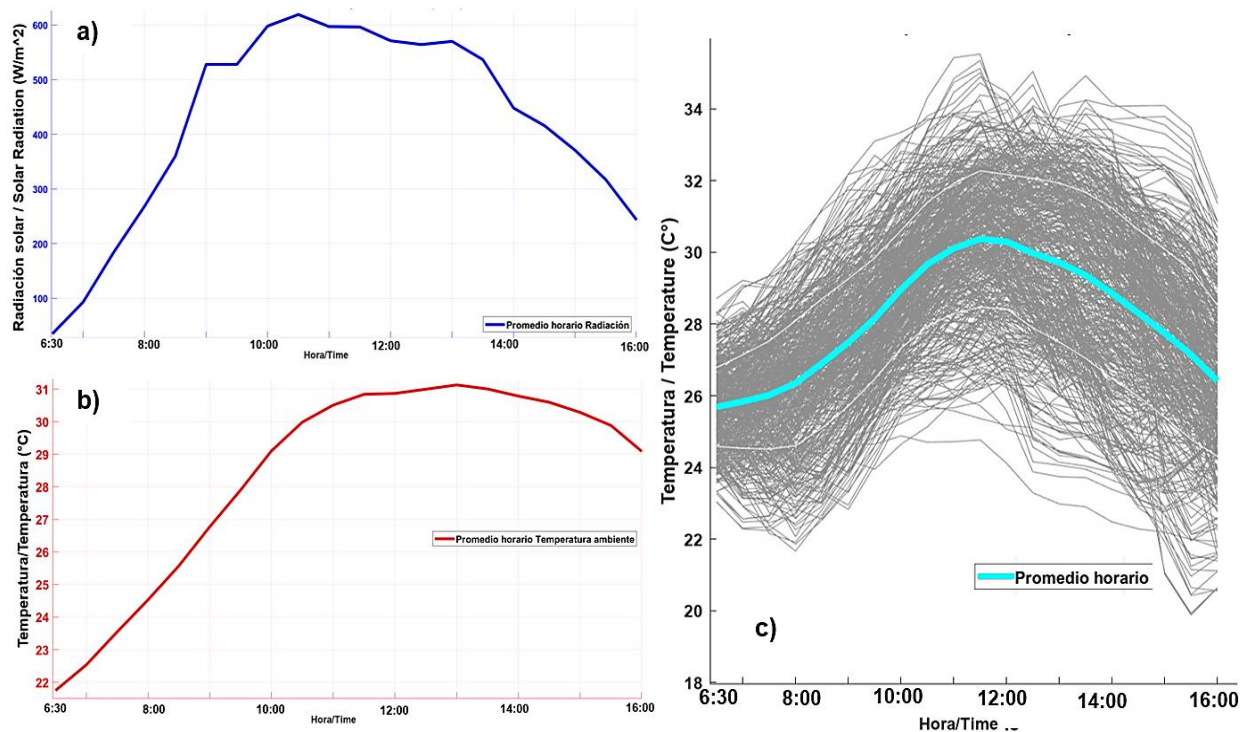
Series de tiempo diarias de la temperatura interna.

A partir de 20 mediciones diarias realizadas en intervalos de 30 minutos, desde las 6:30 hasta las 16:00 horas, se analizaron las series de tiempo del comportamiento de la temperatura interna. En la Figura 59a, se muestra el promedio horario de la radiación solar durante el periodo de estudio, mientras que la Figura 59b presenta la variación del promedio horario de la temperatura ambiente. En ambos casos, se calcularon los promedios en cada intervalo de medición. La Figura

59c muestra las series de tiempo de las 1040 mediciones realizadas, resaltando la línea promedio de todos los datos. Esta última presenta una tendencia similar a la de las dos variables meteorológicas, que son las más influyentes en el fenómeno de transferencia de calor en el concreto. Se destaca que la disminución de la temperatura interna promedio después del mediodía es notablemente marcada, en consonancia con la tendencia de la radiación solar. Esto reafirma que la temperatura interna en el elemento de concreto está más influenciada por la radiación solar que por la temperatura ambiente, al menos durante las horas diurnas.

Figura 59

Series de tiempo promedio horario de (a) radiación solar, (b) temperatura ambiente y (c) temperatura interna.

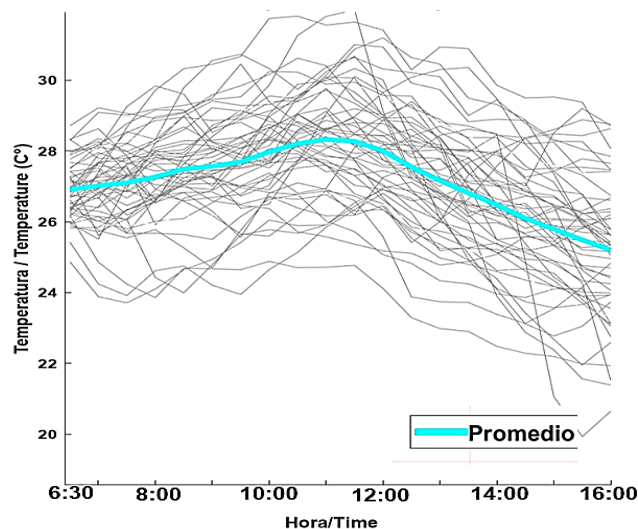


Analizando individualmente las series de tiempo diarias para las temperatura interna en cada uno de los puntos de medición (Figura 60 a Figura 64), se puede observar lo siguiente:

Para el punto P1 (Figura 60), ubicado en la región central de la losa y embebido a 20 mm de la superficie, se observa un incremento de temperatura desde el inicio de la medición hasta cerca del mediodía. Posteriormente, la temperatura disminuye rápidamente hasta alcanzar un valor inferior al registrado al comienzo del día. La pendiente pronunciada después del mediodía sugiere un enfriamiento acelerado debido a la reducción de la radiación solar. No obstante, dada la cercanía del punto P1 a la superficie, es posible que otros factores contribuyan al enfriamiento, como la influencia del viento o la presencia ocasional de lluvia ligera durante las horas de la tarde. La dispersión de las líneas grises en torno a la línea de promedio indica una variabilidad significativa en las mediciones, mostrando que, aunque la temperatura sigue el patrón de temperatura promedio mostrado en la Figura 59, existen fluctuaciones notables.

Figura 60

Series de tiempo de temperatura interna en el punto P1.

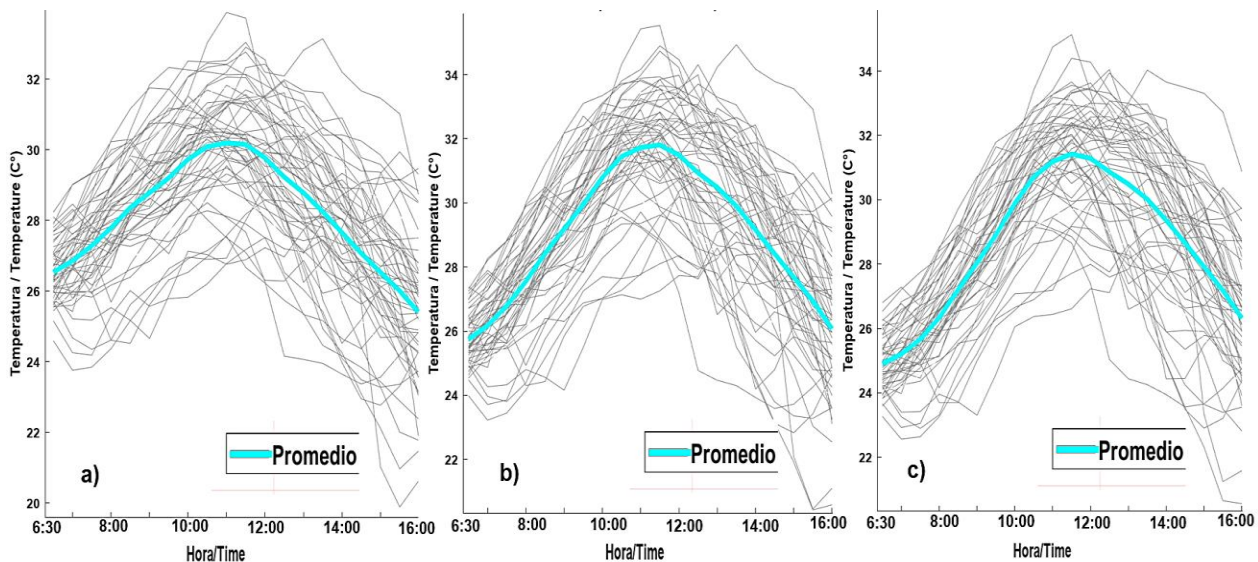


Para los puntos P2, P3 y P4, ubicados a 65 mm, 130 mm y 222 mm de profundidad, respectivamente, la temperatura interna presenta una variación mucho más amplia que en el punto P1, como se evidencia en la Figura 61. Las líneas promedio para estos tres puntos muestran un

aumento de temperatura desde el inicio de la medición hasta aproximadamente el mediodía, seguido de un descenso hasta alcanzar una temperatura cercana a la del inicio. Al igual que en el punto P1, la pendiente pronunciada después del mediodía podría indicar un enfriamiento rápido debido a la reducción de la radiación solar. Las series de tiempo en estos puntos sugieren una transferencia de temperatura más gradual, sin fluctuaciones abruptas. Este comportamiento se refleja en el aumento y descenso de temperatura más moderado y sostenido a lo largo del día, sugiriendo una respuesta térmica más uniforme del material en comparación con el punto P1.

Figura 61

Series de tiempo de temperatura interna de los puntos (a) P2, (b) P3 y (c) P4.



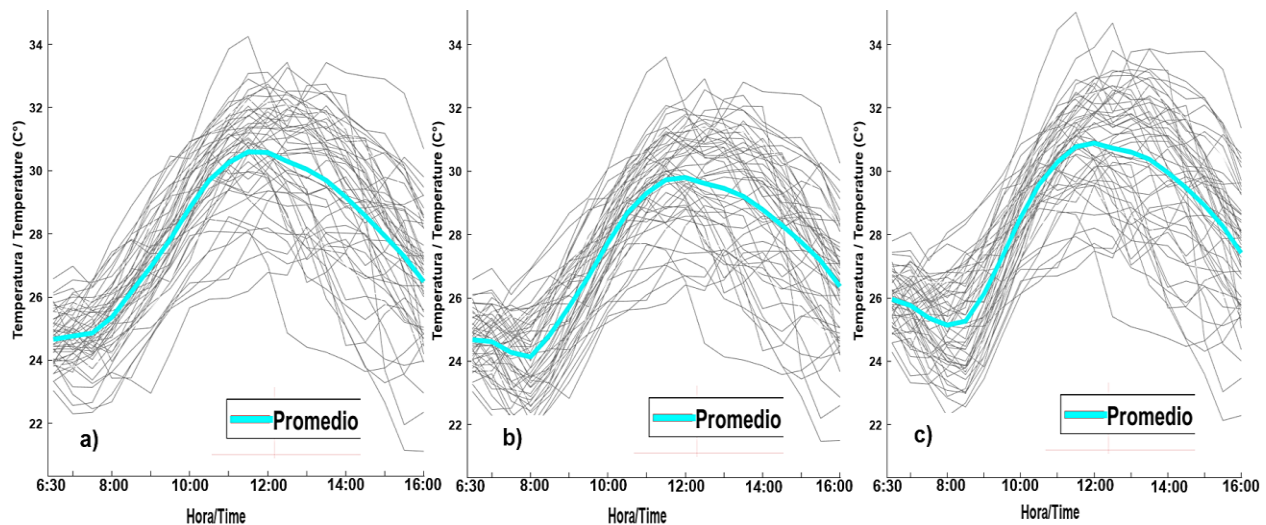
La Figura 62 muestra la variación de la temperatura en los puntos P5, P6 y P7, ubicados a 309 mm, 449.5 mm y 588 mm, respectivamente, en la parte del alma de la viga-losa. Estos puntos tienen un recubrimiento lateral de concreto de 124 mm. Durante las primeras horas de la mañana, la temperatura varía levemente, incluso disminuye en algunas ocasiones, posiblemente debido a la inercia térmica del concreto. Después de las 8:00 horas, la temperatura comienza a aumentar,

alcanzando su pico alrededor del mediodía (a pesar de no tener radiación directa en esta hora del día), lo que sugiere que la viga-loosa absorbe la máxima cantidad de radiación solar en este periodo.

Posteriormente, la temperatura desciende gradualmente, pero al final de las horas de medición los valores son superiores a los registrados al inicio, indicando que el alma de la viga-loosa retiene calor. La ubicación de los puntos de medición en el alma y el concreto circundante influye en la variación de la temperatura, ya que las áreas más angostas pueden presentar diferentes propiedades térmicas en comparación con las áreas más anchas. Por ejemplo, la exposición al viento podría aumentar la pérdida de calor por convección en estas zonas, mientras que el recubrimiento de concreto podría estar aislando los puntos de medición, reduciendo la velocidad de cambio de temperatura.

Figura 62

Series de tiempo de temperatura interna de los puntos (a) P5, (b) P6 y (c) P7.

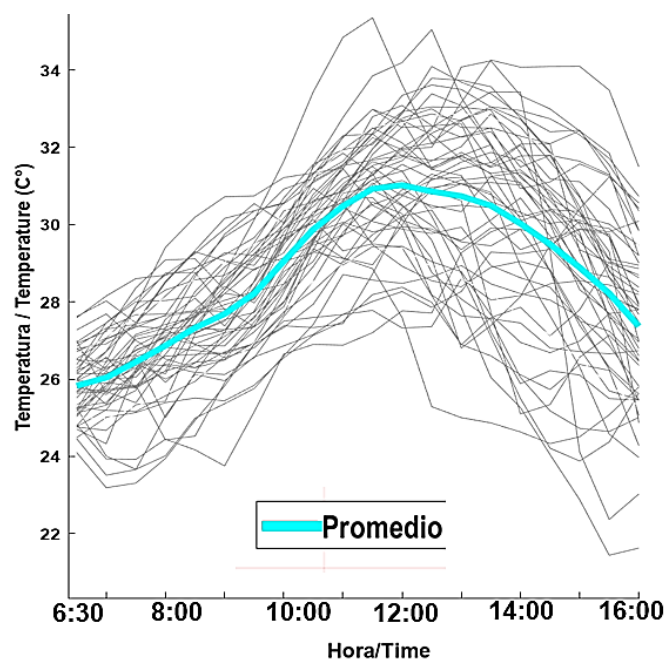


La Figura 63 presenta las series de tiempo de la temperatura interna en el punto P8, ubicado a 725 mm de profundidad en la aleta inferior y con un recubrimiento lateral de concreto de 202 mm. Se observa una variación diurna de la temperatura similar a los puntos más superficiales: la

temperatura aumenta desde el inicio de la medición, alcanza un pico alrededor del mediodía y desciende durante la tarde. Sin embargo, debido a su mayor profundidad y recubrimiento, la variación de temperatura en el punto P8 es más suave en comparación con los puntos P1, P2 y P3, mostrando además una menor dispersión en los valores registrados. La ubicación y el espesor de recubrimiento de concreto en P8 amortiguan los cambios bruscos provocados por las condiciones de la superficie, proporcionando un perfil promedio más estable.

Figura 63

Series de tiempo de temperatura interna en el punto P9.

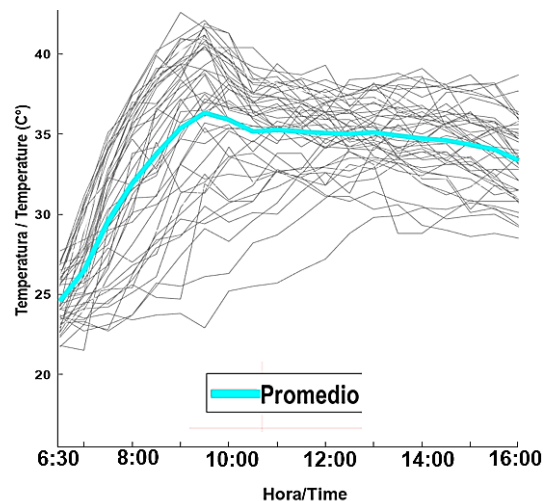


La Figura 64 muestra las series de tiempo de la temperatura interna registrada en el punto P9, ubicado a 822 mm de profundidad con un recubrimiento lateral de concreto de 202 mm. La temperatura promedio en este punto aumenta de manera continua desde las 6:30 horas, alcanzando un pico alrededor de las 9:30 horas. Posteriormente, la temperatura se estabiliza y desciende levemente hasta las 16:00 horas. La variabilidad de la temperatura en P9 es más pronunciada entre

las 6:30 y las 10:00 horas; sin embargo, después de las 10:00 horas, las mediciones se tornan más consistentes, con menor dispersión alrededor de la línea promedio, lo cual indica una mayor estabilidad térmica. La suave pendiente descendente de las series de tiempo después de las 10:00 horas sugiere un enfriamiento más lento en comparación con otros puntos, como el P9. Esto se debe tanto a la disminución de la radiación solar como al efecto de aislamiento natural que proporciona la profundidad del punto, lo cual resulta en una mayor estabilidad térmica y en menores fluctuaciones a lo largo del día.

Figura 64

Series de tiempo de temperatura interna en el punto P9.

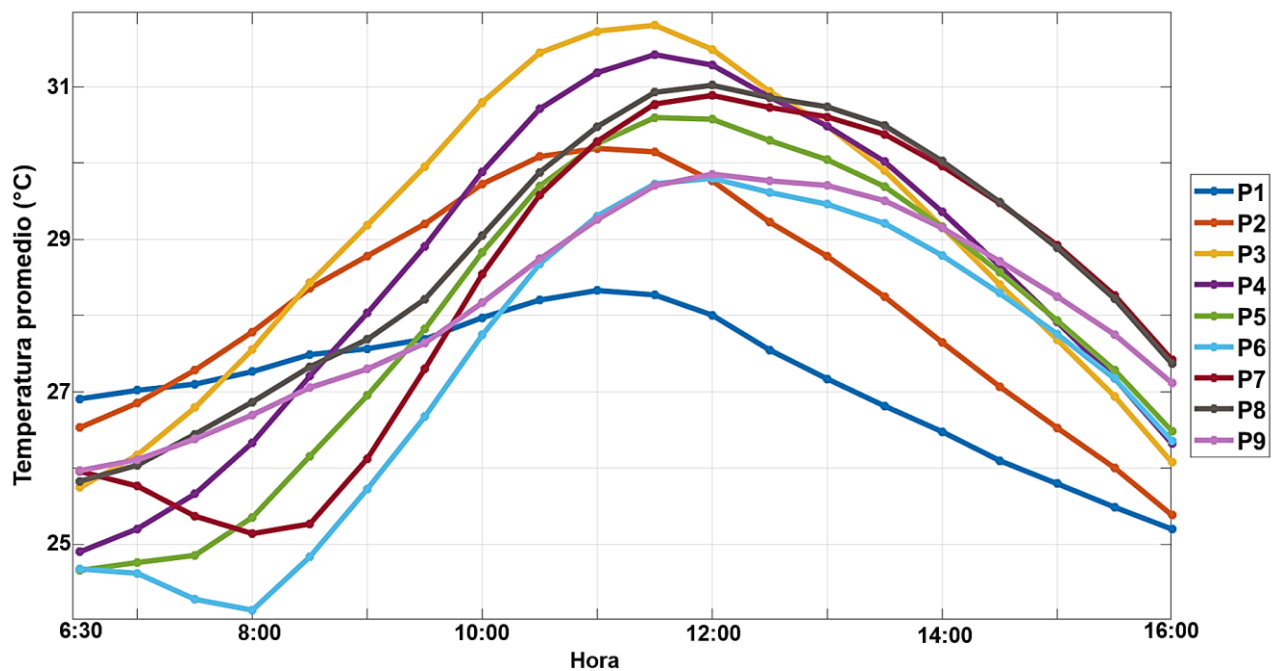


La Figura 65 presenta los promedios de las series de tiempo de temperatura interna en cada uno de los puntos de medición. Cada línea en la figura compila el promedio de las 52 series de tiempo individuales. En esta figura se aprecia que los puntos más cercanos a la superficie (P1, P2 y P3) presentan, en promedio, las temperaturas más altas al inicio de la medición. Además, después del intervalo entre las 10:00 y las 14:00 horas, cuando suelen ocurrir los picos de temperatura interna, la temperatura disminuye. Sin embargo, se observa que en promedio las temperaturas más

bajas después de las 12:00 horas se registran en los puntos más superficiales (P1 y P2). Esto confirma lo observado en la sección previa, a saber, que la profundidad de cada punto (y por ende su interacción con el medio circundante) tiene un impacto significativo en los valores de temperatura registrados. Después de las 12:30 horas, las temperaturas internas en los puntos más profundos (P7, P8 y P9) tienden a ser más elevadas que en los puntos superficiales. Esto se debe a que los puntos más profundos se enfrían más lentamente, ya que están menos expuestos a la radiación solar directa y al enfriamiento por convección del aire circundante (Abid & Özakça, 2020; Kulprapha & Warnitchai, 2012).

Figura 65

Promedios de las series de tiempo de temperaturas internas en cada punto de medición.



4.4. Temperaturas mínimas y uniformes.

En el [Apéndice N](#), se detallan uno a uno, los 1040 valores mínimos de temperatura interna registrada en cada instante de medición y se indica su respectiva profundidad. Estos resultados se resumen en la Tabla 14, en la cual se observa que el 51.3% de las mediciones de la temperatura mínima interna fue registrada en el punto P1. Por otro lado, el 36.1% de las mediciones registraron la temperatura mínima interna en el punto P6, el cual se encuentra a la mitad en el alma de la sección (a 449.5 mm de profundidad), con un recubrimiento lateral de 124 mm. En ambos puntos se confirma su sensibilidad a las variables meteorológicas que provocan enfriamiento, debido principalmente al poco concreto circundante.

Tabla

14

Profundidad y conteo de temperatura internas mínimas horarias.

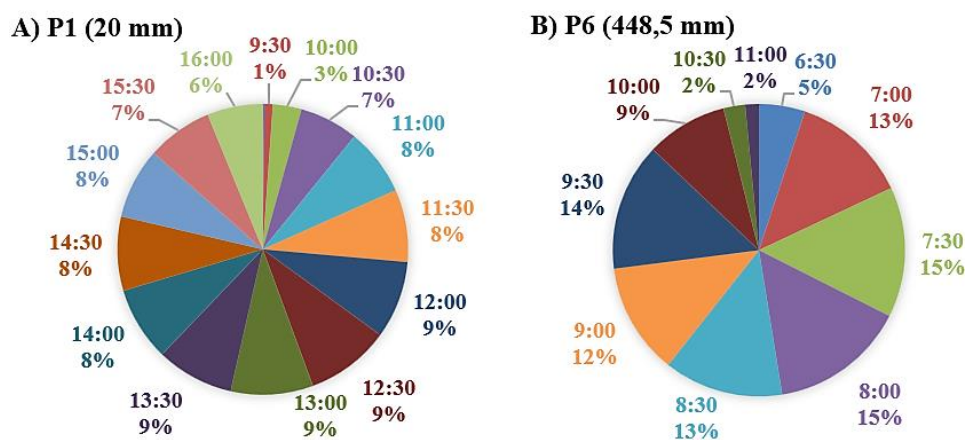
Punto (profundidad)	Conteo	Porcentaje
P1 (20 mm)	534	51.3%
P2 (65 mm)	24	2.3%
P3 (130 mm)	5	0.5%
P4 (222 mm)	6	0.6%
P5 (309 mm)	50	4.8%
P6 (448,5 mm)	375	36.1%
P7 (588 mm)	18	1.7%
P8 (725 mm)	0	0.0%
P9 (822 mm)	28	2.7%

La Figura 66 muestra los porcentajes de ocurrencia por hora de la temperatura interna mínima en los puntos P1 y P6. Esta revela que las temperaturas mínimas en el punto P1 se registraron de 9:00 y hasta las 16:00 horas (Figura 66a), es decir, prácticamente a lo largo del día. Durante estas horas, como ya se ha discutido anteriormente, la velocidad del viento y la radiación tenían una alta variación e incluso alcanzaban sus máximos diarios. Por otro lado, se observó que

en algunas ocasiones (36.1% de los casos) las temperaturas internas mínimas en los puntos ubicados en el alma (como el P6), ocurren entre las 6:30 y las 9:30 horas (Figura 66b), con frecuencias menores al 1% para el resto de las horas.

Figura 66

Porcentajes de ocurrencia por hora de la temperatura interna mínima en (a) P1 y (b) P6.



A partir del análisis de las temperaturas mínimas internas, se define la temperatura uniforme en el elemento de concreto, siguiendo el criterio establecido por Hagedorn et al. (2019) y también J. Lee (2012). La temperatura se considera uniforme cuando no hay variaciones significativas a lo largo del volumen de un material. En este estudio se adoptó la temperatura mínima registrada en cada instante de medición como la temperatura uniforme interna de la sección viga-losa. Este valor se utilizó como punto de partida para calcular los gradientes térmicos (Sec. 3.3). En este enfoque se asume que el gradiente parte de cero en el punto con la temperatura mínima, la cual cambia de altura en cada instante de medición.

La adopción de la temperatura mínima como referencia permite identificar de manera efectiva los cambios térmicos más sutiles dentro del material, proporcionando una base sólida para

calcular los gradientes térmicos que se desarrollan en la sección de la viga-losa. Por ejemplo, la Tabla 15 muestra un extracto de los datos de temperatura registrados a lo largo de seis horas del 09/09/2023. En cada instante de medición se identificó la temperatura mínima y su ubicación en la profundidad de la viga-losa. Esta temperatura mínima se utiliza como referencia para calcular los gradientes térmicos verticales internos en cada instante de medición. Los gradientes térmicos verticales externos, obtenidos a partir de las temperaturas superficiales registradas mediante fotografías térmicas, se analizaron siguiendo la misma metodología descrita para los gradientes internos.

Tabla**15**

Extracto del registro de temperatura mínimas en diferentes instantes de medición.

Fecha	Temperatura mínima horaria (°C)	Profundidad	Fecha	Temperatura mínima horaria (°C)	Profundidad
9/09/2023 6:30	25,54	309 mm	9/09/2023 8:30	26,70	448,5 mm
9/09/2023 7:00	25,03	448,5 mm	9/09/2023 9:00	26,29	448,5 mm
9/09/2023 7:30	25,86	448,5 mm	9/09/2023 9:30	27,70	448,5 mm
9/09/2023 8:00	26,49	448,5 mm	9/09/2023 10:00	29,11	20 mm

Así mismo, para las temperaturas externas, los datos recolectados se agruparon según la profundidad de los puntos de medición con el valor de temperatura mínima, resultando en la Tabla 16. La tabla muestra el porcentaje de registros de temperatura mínima en los diez puntos específicos de la cara ESTE de la viga-losa, con profundidades que van desde 20 mm hasta 822 mm. La mayoría de las temperaturas mínimas se encontraron en el punto externo P6 (309 mm), representando el 35.4% del total de mediciones, seguido por el punto P4 (130 mm) con un 35.3%.

Otros puntos de medición tuvieron un porcentaje significativamente menor de temperaturas mínimas externas.

Tabla

16

Profundidad y porcentaje de ocurrencia de temperatura externa mínimas horarias.

Punto	Profundidad	Porcentaje
P1	20 mm	9.5%
P2	65 mm	0.9%
P3	110 mm	0.9%
P4	130 mm	35.3%
P5	222 mm	0.3%
P6	309 mm	35.4%
P7	448.5 mm	3.2%
P8	588 mm	14.2%
P9	725 mm	0.3%
P10	822 mm	0.1%

4.5. Comportamiento térmico en días característicos.

Los días con características meteorológicas específicas no fueron necesariamente atípicos, pero se caracterizaron por la presencia de condiciones meteorológicas particulares que impactaron notablemente en los perfiles térmicos internos y externos. Estos días proporcionaron una oportunidad para entender cómo las variables meteorológicas influyen en los perfiles de temperatura de la viga-losa y cómo el espécimen responde a estas variaciones. En la Tabla 17 se detallan los días característicos seleccionados y el evento meteorológico ocurrido. A continuación, se detallan las tendencias observadas en estos días, así como el comportamiento de los perfiles verticales de temperatura.

Tabla

17

Nomenclatura de días característicos y evento específico principal.

Día	Fecha	Evento meteorológico principal
DS1	22/09/2023	Mayor velocidad promedio diaria del viento
DS2	23/09/2023	Máxima temperatura ambiente registrada durante todo el estudio
DS3	06/10/2023	Máxima radiación solar registrada durante todo el estudio
DS4	20/10/2023	Único día con radiación solar de 0 W/m ² (a las 6:30) y con la precipitación más larga de todo el estudio

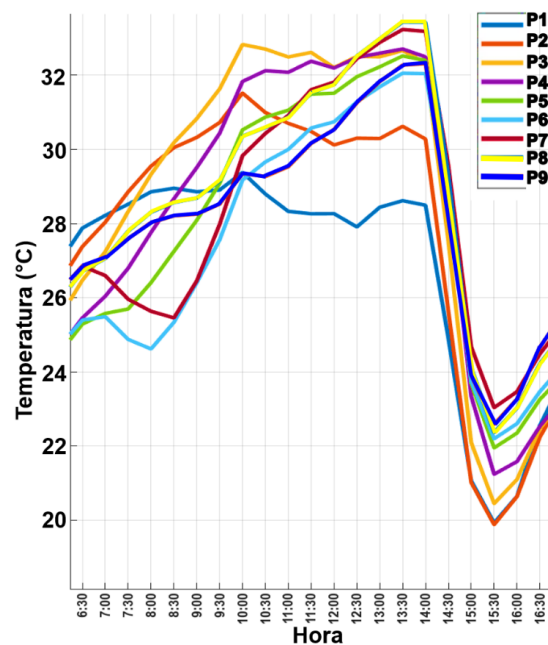
DS1 (22 de septiembre de 2023): este día corresponde al décimo cuarto del período de medición y se caracterizó por tener la mayor velocidad promedio diaria del viento (0.8 m/s) registrada durante todo el período de medición, lo cual corresponde a una ventolina, con velocidades entre 0.3 m/s y 1.5 m/s (IDEAM, 2017). Durante este día no hubo precipitación, el pico de radiación solar (943 W/m²) ocurrió a las 12:30 horas y, una hora después, tuvo lugar el pico máximo de temperatura ambiente (34.3°C).

En la Figura 67 se muestran los registros de la velocidad del viento durante todo el día. Se aprecia un período de cuatro horas (10:00 a 14:00 horas) con velocidad constante del viento de 0.9 m/s proveniente principalmente del norte, seguido de un aumento a brisas débiles de 1.8 m/s y 2.2

Posteriormente, el aumento en la velocidad del viento después de las 14:00 horas coincidió con la disminución importante de la temperatura interna de la viga-losa (Figura 69), logrando que estas sean más bajas que las registradas durante las primeras horas de medición. Esto sugiere una influencia significativa del viento en la variación de temperatura interna en la viga-losa de concreto, siendo el enfriamiento por convección su principal efecto. Se podría considerar que el efecto del viento, al ser importante después de los picos de radiación y de temperatura ambiente, disminuye en gran medida el efecto de la inercia térmica del elemento de concreto. Esto acelera el enfriamiento y evita que la superficie se caliente más que internamente, a diferencia de lo que sucedió en otros casos.

Figura 69

Series de tiempo de la temperatura interna del día DS1.

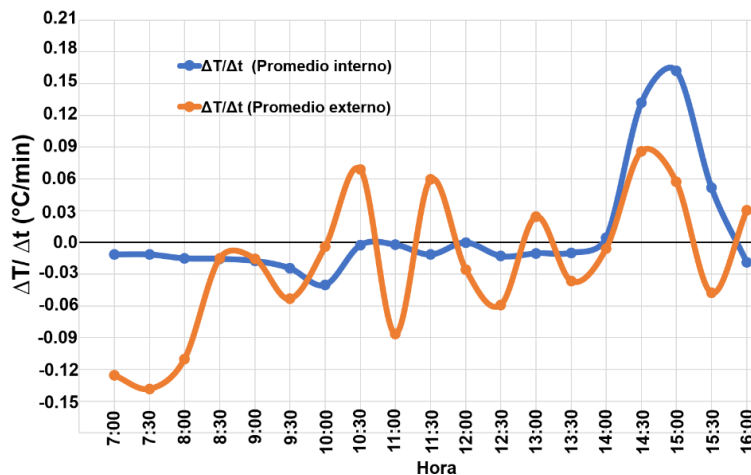


Para confirmar lo mencionado, se calculó la tasa del cambio de la temperatura promedio interna y externa de la viga-losa respecto al tiempo. Esto se obtiene calculando el cambio de temperatura (ΔT) entre mediciones sucesivas y dividiéndolo por el intervalo de tiempo (Δt) entre

ellas. Posteriormente se calculó la velocidad de enfriamiento promedio ($\Delta T/\Delta t$) en cada hora de medición. Un ΔT positivo indica un aumento de temperatura, mientras que un ΔT negativo indica una disminución. La Figura 70 muestra la tasa de cambio de la temperatura promedio respecto al tiempo (velocidad de enfriamiento). Se evidencia que, después de las 14:00 horas, la tasa de enfriamiento promedio para la temperatura interna es mayor que para la externa, excepto en el último intervalo de tiempo (15:30 – 16:00 horas), donde un aumento abrupto en la radiación solar aumentó la temperatura externa mientras la interna seguía disminuyendo. Esto demuestra cómo el viento impacta en la reducción de la temperatura interna, especialmente cuando la radiación solar está disminuyendo en las horas vespertinas.

Figura 70

Velocidad de enfriamiento promedio en puntos internos y externos de la viga-losa – DS1

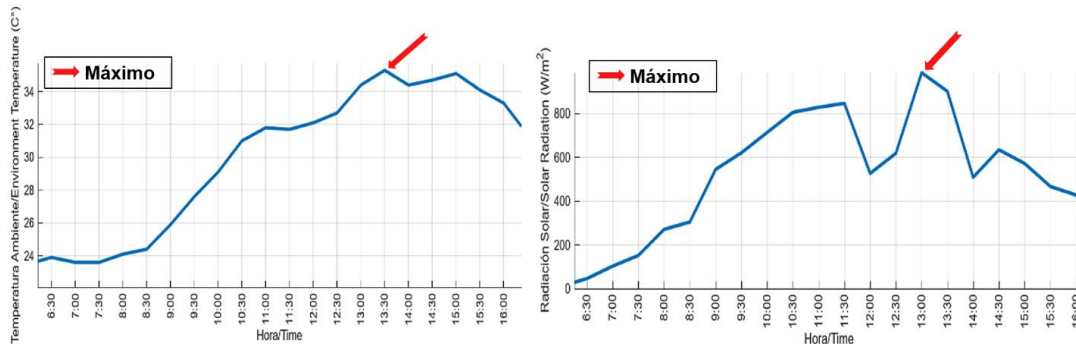


DS2 (23 de septiembre de 2023): este fue el décimo quinto día del período de medición y se caracterizó por tener la máxima temperatura ambiente (35.3°C) registrada, la cual ocurrió a las 13:30 horas. Durante todo el día, la velocidad del viento se mantuvo en el rango de ventolina, con velocidades entre 0.3 m/s y 1.5 m/s (IDEAM, 2017). Además, no hubo precipitación y el máximo de radiación solar fue de 987 W/m^2 (a las 13:00 horas), siendo este el segundo día con la radiación

más alta de todo el período de medición. La Figura 71 muestra los registros de la temperatura ambiente y la radiación solar durante el día DS2.

Figura 71

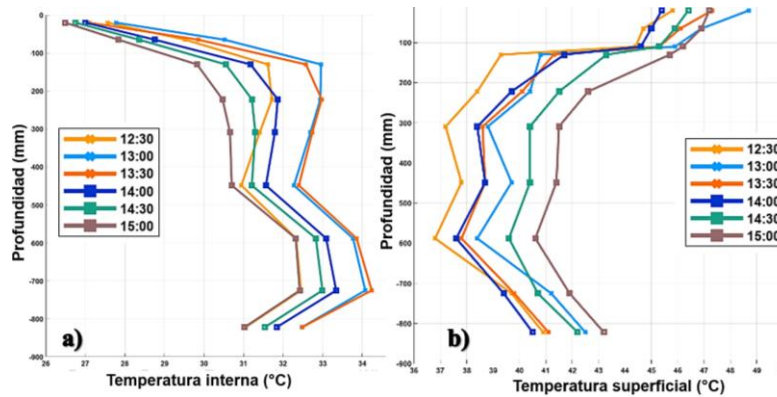
Temperatura ambiente (izquierda) y radiación solar (derecha) para el día DS2.



Los perfiles verticales de temperatura interna y externa mostraron tendencia similares a las de un día normal sin precipitación y con ventolina. Este comportamiento se mantuvo hasta que ocurrieron los máximos de radiación solar y temperatura ambiente. Posterior a los máximos de estas variables meteorológicas, la respuesta en ambos perfiles divergió, siguiendo la misma tendencia observada en el día DS1: internamente, la temperatura descendió (Figura 72a) mientras que externamente la temperatura aumentaba (Figura 72b). En este lapso, los perfiles individuales de cada medición muestran una tendencia similar y las variaciones entre cada medición son menores a 1°C, indicando una consistencia en el comportamiento térmico del material bajo las condiciones observadas.

Figura 72

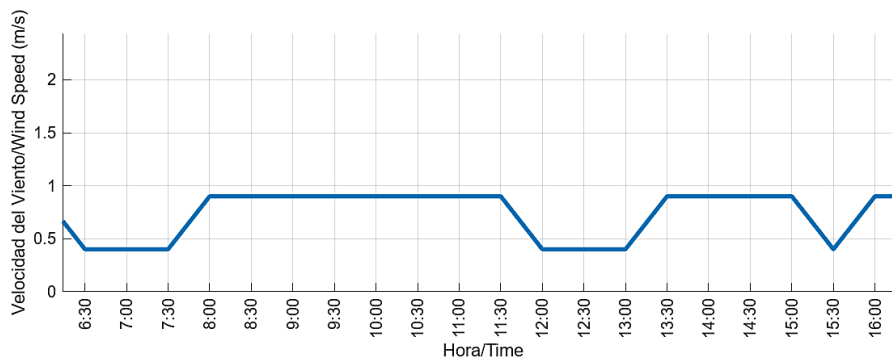
Perfiles térmicos verticales del día DS2: (a) temperatura interna y (b) temperatura externa.



El comportamiento de la temperatura interna y externa para DS2 se debe a que la superficie del concreto, especialmente la más expuesta, está en contacto directo con el aire circundante, siendo susceptible a cambios rápidos de temperatura debido a la radiación solar y la convección del aire. Aunque la radiación solar disminuye después del mediodía, la temperatura superficial puede seguir aumentando debido a la acumulación de calor en la superficie y la radiación térmica residual del entorno. La dirección y velocidad del viento también influyen: un viento constante puede enfriar la superficie del concreto más rápido que el interior, pero en este caso, con ventolina (≤ 1 m/s) durante todo el día (Figura 73), el viento no es lo suficientemente fuerte y permitió que la superficie se calentase más por la radiación solar directa.

Figura 73

Velocidad del viento para el día DS2.

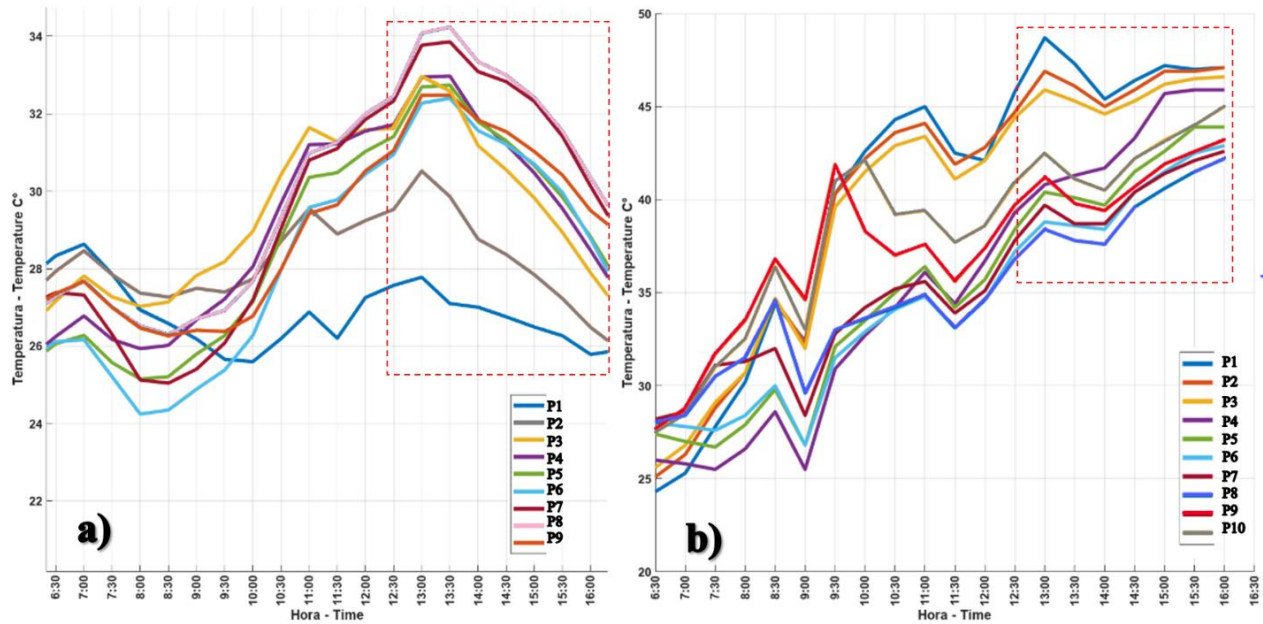


Este fenómeno se corrobora al analizar las series de tiempo de la temperatura interna y externa en DS2. Después de los máximos de radiación solar y temperatura ambiente (13:00 y 13:30 horas, respectivamente), la temperatura interna disminuye gradualmente en todos los puntos de medición (Figura 74a), coincidiendo con el descenso de la temperatura ambiente y la radiación solar. Sin embargo, la temperatura superficial sigue aumentando (Figura 74b), a pesar de que la temperatura ambiente y la radiación solar han disminuido. Al interior de la viga-losa, el calor se libera hacia fuera una vez la temperatura ambiente empieza a disminuir después de las 13:00 horas, haciendo que la superficie registre un aumento de temperatura en comparación al interior. Este fenómeno se observó hasta las 16:00 horas, cuando se realizó la última medición, con la temperatura superficial aún en aumento aunque cada vez en menor proporción a medida que terminaba el día.

Sumado a los anterior, la inercia térmica del concreto (Fritz & Ubilla, 2012) desempeña un papel crucial en su comportamiento térmico. La masa del concreto absorbe y retiene el calor, lo que ralentiza el enfriamiento interno una vez que se alcanza el pico de radiación solar. Aunque la radiación solar disminuye después del mediodía, el calor almacenado en el interior del concreto se disipa de manera gradual, lo que resulta en una lenta disminución de la temperatura interna y en un aumento de la temperatura superficial a medida que el calor se transfiere hacia la superficie.

Figura 74

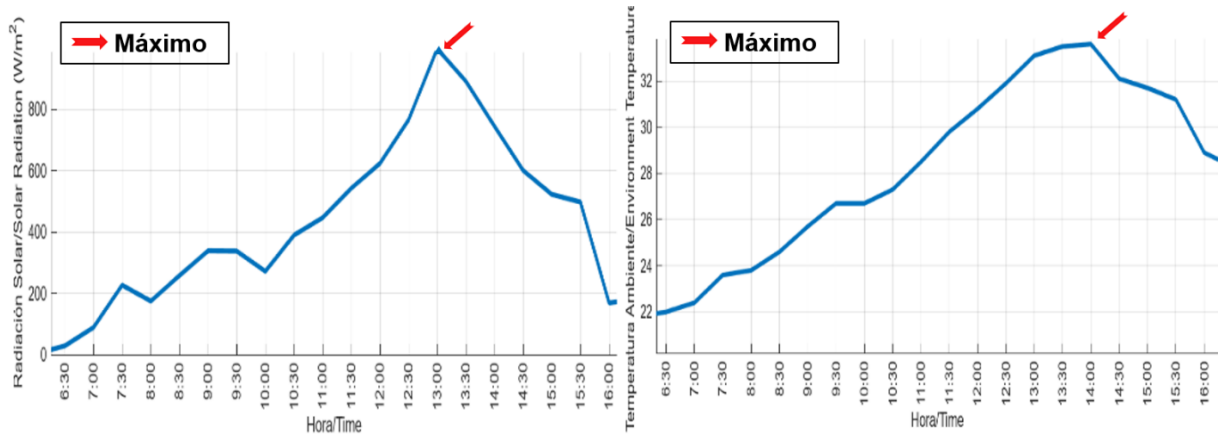
Series de tiempo de la temperatura para el día DS2: (a) interna y (b) externa



DS3 (6 de octubre de 2023): este día corresponde al vigésimo octavo día del periodo de medición y se caracterizó por ser un día con ventolina y sin precipitación, pero con la mayor radiación solar (998 W/m^2) registrada durante el estudio, ocurrida a las 13:00 horas. Una hora después del máximo de radiación solar ocurrió el pico de temperatura ambiente ($33,6^\circ\text{C}$). En las Figura 75a y Figura 75b se muestran los registros de la radiación solar y la temperatura ambiente durante todo el día, respectivamente.

Figura 75

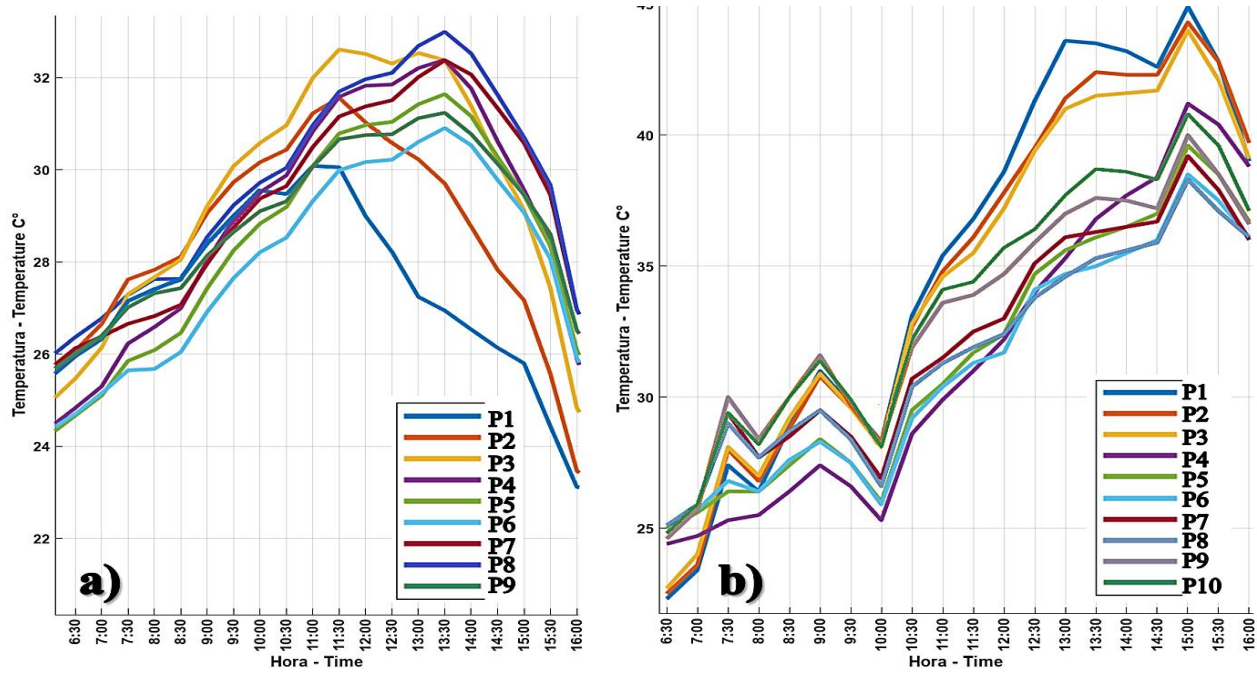
Temperatura ambiente (izquierda) y radiación solar (derecha) para el día DS3.



El comportamiento de la temperatura interna y externa en este día fue similar al DS2, pero posterior a los picos de temperatura ambiente y radiación se presentaron algunas diferencias. Internamente, la temperatura en los puntos P3 a P9 comenzó a disminuir después del pico de radiación a las 13:30 horas (Figura 76a), aunque en los puntos P1 y P2 (ubicados en la losa) el descenso de la temperatura inició a las 11:30 horas (2 horas antes). Externamente, la temperatura aumentó desde las 10:00 horas hasta las 15:00 horas, incluso después de los máximos de radiación y temperatura ambiente, y posteriormente descendió (Figura 76b). Este último contrasta a lo ocurrido en DS2 (durante las 13:00 horas hasta las 16:00 horas). Al comparar las series de tiempo de la temperatura interna y externa, se evidencia nuevamente la presencia de la inercia térmica (Fritz & Ubilla, 2012). Mientras los termopares registran una disminución de temperatura desde las 13:30 horas hasta las 16:00 horas, la cámara térmica superficial registra un aumento de temperatura de las 13:00 horas hasta las 15:00 horas. Esto ocurrió incluso cuando la temperatura ambiente y la radiación solar ya estaban descendiendo. Posterior a las 15:00 horas, se nota el efecto del enfriamiento por convección superficialmente.

Figura 76

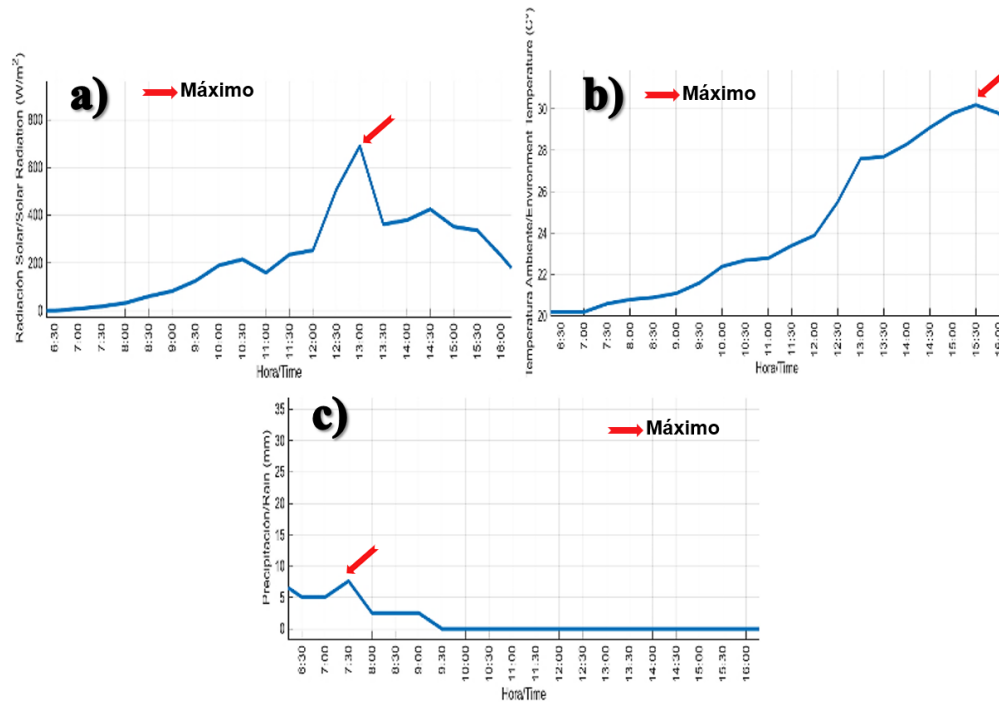
Series de tiempo de la temperatura para el día DS3: (a) interna y (b) externa.



DS4 (20 de octubre de 2023): este día corresponde al cuadragésimo segundo del período de medición y se caracterizó por ser el único día con radiación de 0 W/m^2 al inicio de la medición. El día presentó un máximo de radiación solar (690 W/m^2) a las 13:00 horas y un máximo de temperatura ambiente (30.2°C) a las 15:30 horas. Además, hubo viento calmado ($\leq 0.2 \text{ m/s}$) durante todo el día y ocurrió la precipitación de mayor duración de todo el período de medición, extendiéndose desde las 6:30 hasta las 9:30 horas (tres horas continuas). En la Figura 77 se muestran los registros de radiación solar, temperatura ambiente y precipitación durante DS4. El comportamiento de las variables meteorológicas en este día fue particular. Debido a la lluvia prolongada por las tres primeras horas de medición, en este periodo la radiación solar y la temperatura ambiente aumentaron de manera gradual y lenta a comparación con otros días, con valores inferiores a 82 W/m^2 y 21.1°C , respectivamente.

Figura 77

Respuesta en el tiempo para el día DS4 de la (a) radiación solar, (b) temperatura ambiente y (c) precipitación.



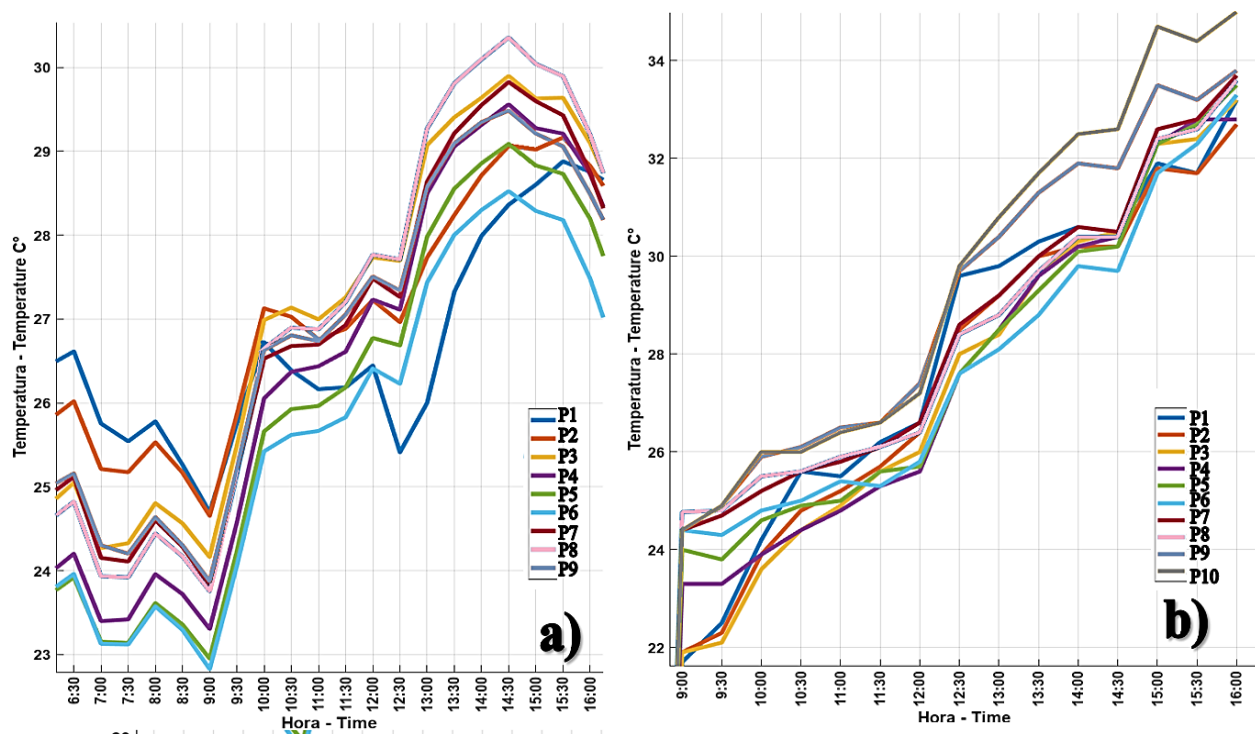
Al iniciar la medición solo se pudo registrar la temperatura externa a partir de las 9:00 horas. Como se observa en la Figura 78a, la temperatura interna de la viga descendió gradualmente durante el periodo de lluvia y hasta las 9:00 horas. Esto demuestra que, aunque la temperatura ambiente y la radiación solar ya aumentaban durante esas horas de manera lenta y gradual debido a la alta nubosidad, la precipitación fue la variable que más influyó en el comportamiento de la temperatura interna entre las 6:30 y las 9:00 horas. Además, durante este período se registraron vientos calmados, lo que limitó el efecto del enfriamiento por convección.

Después de las 9:00 horas, la temperatura interna siguió una tendencia similar a la de la temperatura ambiente, reflejando un aumento proporcional conforme aumentaba la variable meteorológica. Sin embargo, es interesante notar que la temperatura superficial de la viga-losa

continuó aumentando incluso después de alcanzar los picos de radiación y temperatura ambiente, como se observa en la Figura 78b. Este comportamiento es similar a lo ocurrido en DS2, donde la inercia térmica del concreto hace que la superficie retenga y libere calor lentamente que el interior.

Figura 78

Respuestas observadas de las series de tiempo de puntos (a) internos y (b) externos – DS4.



En este día en particular, la alta nubosidad y la prolongada precipitación contribuyeron a un aumento retardado y gradual de la temperatura, con el pico de radiación solar ocurriendo a las 13:00 horas y el pico de temperatura ambiente dos horas y media después, a las 15:30 horas, lo cual fue inusual ya que generalmente los máximos solían presentarse entre las 10:00 horas y 14:00 horas.

4.6. Gradientes térmicos verticales.

Los gradientes térmicos verticales (GTV) para cada instante de medición se calcularon a partir de las diferencias entre la temperatura en cada punto de medición y la temperatura mínima absoluta en dicho instante, tal y como se describe en la Secciones 3.2 y 3.3. Estas diferencias se derivaron directamente de los perfiles de temperatura externos e internos discutidos en la Secciones 4.2.1 y 0, respectivamente.

Los gradientes calculados proporcionan una medida cuantitativa de cómo varía la temperatura a lo largo de la altura de la viga, a partir de cierta temperatura de referencia, y permiten identificar patrones de comportamiento térmico bajo diferentes condiciones ambientales. Los gradientes se analizaron para diversos momentos del día, destacando los periodos de mayor variación térmica como el mediodía y las primeras horas de la tarde. Además, se realizó un análisis comparativo de los gradientes térmicos verticales en diferentes días con características meteorológicas distintivas, como días soleados, nublados y con precipitación. Este análisis permitió identificar cómo las condiciones climáticas específicas influyen en la distribución de temperatura dentro de la viga.

Gradientes térmicos verticales externos medidos con el VANT.

Durante los 52 días de estudio, se obtuvieron 1006 GTV externos (en promedio 20 GTV por día), equivalente a la diferencia de temperatura (ΔT) respecto a la temperatura de referencia.

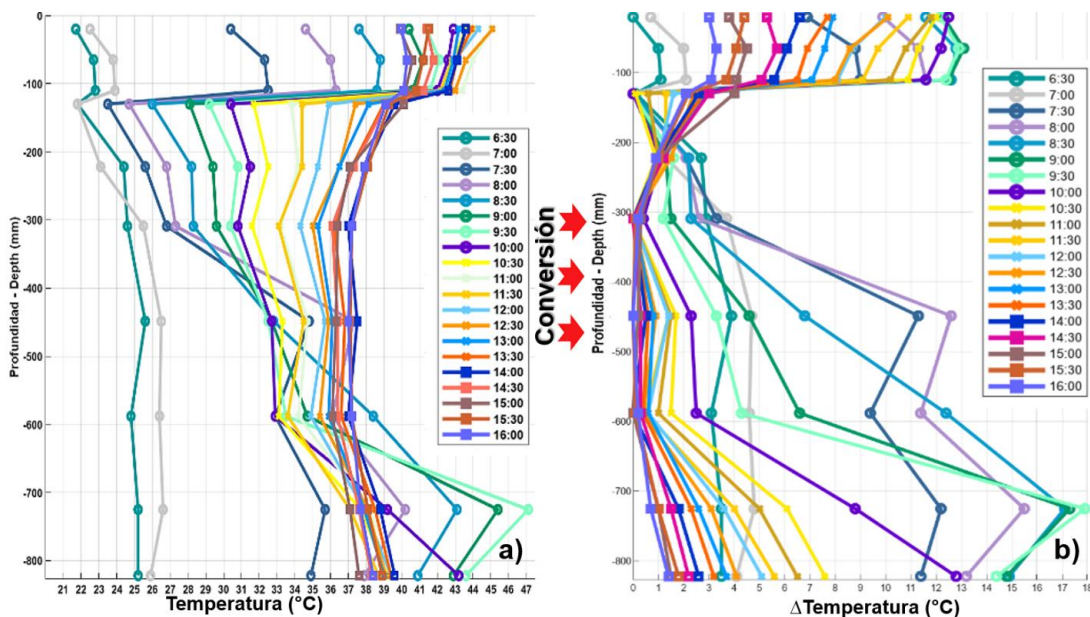
Por ejemplo, para el 11/09/2023, la Figura 79 muestra los perfiles verticales de temperatura externa y sus respectivos GTV. En los perfiles de temperatura (Figura 79a), se observa una variación desde la región central de la losa hasta la profundidad, con mediciones en intervalos de 30 minutos que permiten visualizar la respuesta térmica del concreto a las condiciones ambientales diurnas. En los GTV (Figura 79b), los gradientes entre las 6:30 y las 9:30 horas muestran

variaciones sin una tendencia clara y con magnitudes cercanas entre sí. Sin embargo, a partir de las 10:30 horas, estos presentan una tendencia uniforme y similar en magnitud, especialmente en el alma, donde la temperatura aumenta progresivamente hacia la aleta inferior, utilizando como referencia la temperatura en el punto P6. Esta representación permite observar cómo el calor se propaga a través del concreto a distintas profundidades a lo largo del día, reflejando los efectos de la radiación solar y otras condiciones meteorológicas en el comportamiento térmico de la estructura. Cada línea de color representa un momento específico del día, permitiendo observar la evolución del gradiente térmico y la propagación del calor a través del material. Debido a la alta variabilidad de los gradientes en un solo día, se buscó identificar tendencias generales agrupando los resultados según las franjas horarias previamente definidas.

Figura

79

Variación térmica externa 11/09/2023: (a) perfiles verticales de temperatura y (b) GVT.



Franjas horarias de los GTV externos.

Con este enfoque, se agruparon los gradientes térmicos en intervalos de tiempo específicos (Tabla 1), permitiendo observar patrones de comportamiento consistentes a lo largo del día. Este análisis facilita la identificación de tendencias de temperatura en función de las variaciones horarias y aporta una visión clara del comportamiento térmico general de la estructura, minimizando la influencia de fluctuaciones puntuales.

La Figura 80 muestra los gradientes obtenidos a partir de los perfiles de temperatura medidos con el VANT para las dos primeras franjas horarias (6:30-8:30 y 9:00 – 11:00 horas). En todas las gráficas, los gradientes calculados se muestran en color gris y se resalta el gradiente promedio correspondiente (línea azul), además del gradiente promedio más o menos una desviación estándar (línea roja).

En la Figura 80a, correspondiente a la franja 1 (6:30-8:30), los gradientes térmicos verticales externos exhiben un patrón característico con tres zonas distintivas: la zona superior (P1-P3) con ΔT promedio (Tabla 18) entre 3.5°C y 4.5°C (desviación entre ± 3.7 y $\pm 4.0^{\circ}\text{C}$), una zona de transición abrupta en P4 (ΔT promedio de $0.6^{\circ}\text{C} \pm 1.2^{\circ}\text{C}$, con el 66% de las mediciones registrando $\Delta T=0$), y una zona inferior (P7 - P9) con ΔT más elevados, alcanzando un máximo de 17.1°C en P9 con un promedio de $7.1^{\circ}\text{C} (\pm 4.6^{\circ}\text{C})$. Esta distribución muestra una marcada asimetría térmica, donde los puntos inferiores experimentan gradientes significativamente mayores que la zona superior, con diferencias superiores a 2°C y desviaciones estándar más amplias (de $\pm 3.2^{\circ}\text{C}$ hasta $\pm 4.6^{\circ}\text{C}$) en la región inferior.

Para la franja 2 (Figura 80b) ocurre algo similar a la franja 1 donde el punto P4 prevalece también con valores de $\Delta T = 0.2^{\circ}\text{C} \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ que corresponden al 73% de los datos en esta franja horaria. Sin embargo, la desviación entre los gradientes es mucho menor en la zona del alma. En

esta zona comprendida entre los puntos P6 y P8, la desviación en la franja horaria 2 osciló entre 0.6°C y 1.5°C, mientras que en la franja horaria 1 varió entre 1.3°C y 3.2°C, como se detalla en la Tabla 18. La zona superior (P1-P3) presenta ΔT promedio más elevados (9.2-9.3°C \pm 3.2-3.3°C) que en la franja 1. Los valores de ΔT en esta franja llegan hasta 17.9°C, siendo típicamente en el punto P9 y resultó mayor (por 0.8°C) que en la franja 1, con un promedio de 7.4°C (\pm 4.5°C). Se observó que, en diversos casos, la temperatura en los puntos inferiores de la viga-losa es mayor (en más de 2°C) que en los puntos ubicados en la región central de la losa, resaltando la importancia de cómo la posición del sol impacta directamente en la parte inferior en esta franja.

Figura 80

Gradientes térmicos verticales externos para:(a) franja 1 y (b) franja 2.

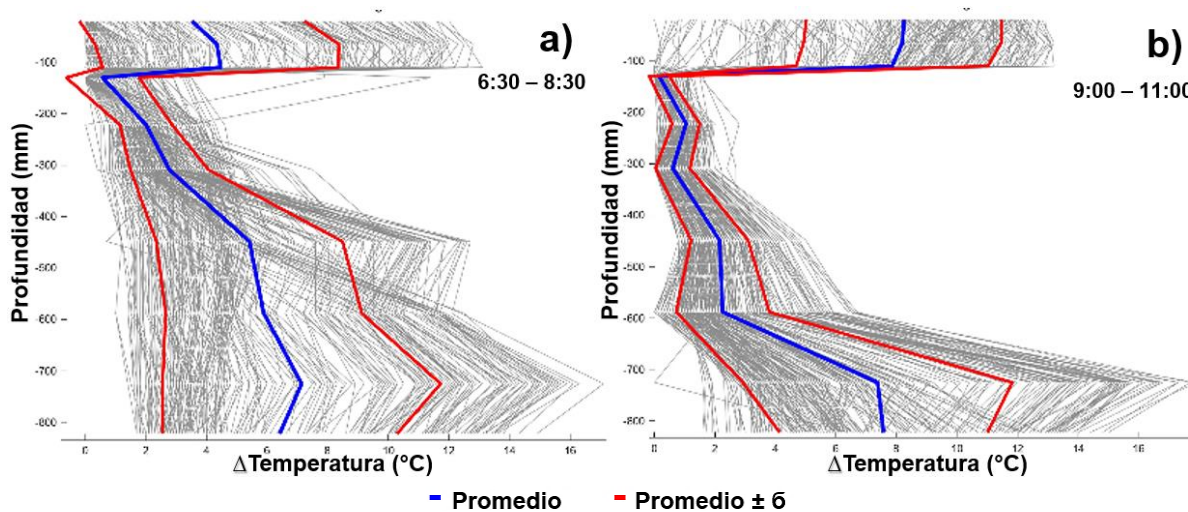


Tabla 18

Valores de ΔT (°C) por cada punto de medición para las franjas 1 y 2.

Franjas Punto	1				2			
	Máximo	Mínimo	Promedio	Desviación	Máximo	Mínimo	Promedio	Desviación
P1	12,0	0,0	3,5	3,7	12,9	0,0	8,3	3,2
P2	12,8	0,0	4,3	4,0	13,2	0,2	8,2	3,3
P3	13,1	0,0	4,5	3,9	13,2	0,0	7,9	3,2
P4	11,4	0,0	0,6	1,2	1,6	0,0	0,2	0,3
P5	4,6	0,0	2,0	0,9	2,8	0,1	1,0	0,5
P6	7,5	0,4	2,8	1,3	2,7	0,0	0,6	0,6

P7	12,7	0,7	5,4	3,1	5,0	0,8	2,2	0,9
P8	12,5	1,0	5,9	3,2	6,7	0,0	2,3	1,5
P9	17,1	1,4	7,1	4,6	17,9	0,0	7,4	4,5
P10	14,9	1,7	6,4	3,9	15,0	1,6	7,6	3,4

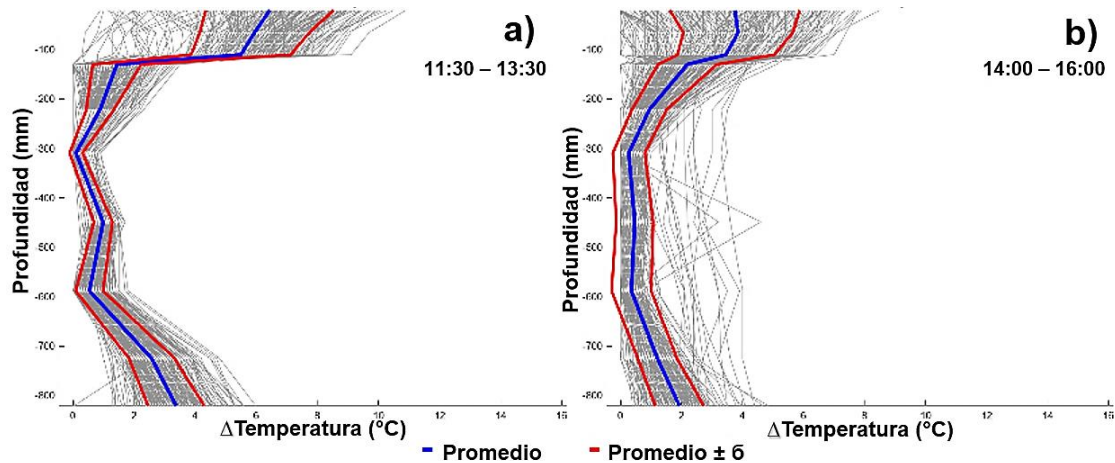
En la franja horaria 3 (Figura 81a), los GTV externos tienen a tendencia similar a la de las franjas 1 y 2, pero con menor variabilidad. La desviación estándar en la franja 3 fue significativamente menor en comparación con las otras franjas. Específicamente, la máxima desviación en los puntos de la franja 3 fue de 2.1°C (Tabla 19), mientras que en las franjas 1 y 2 fueron de 4.6°C y 4.5°C, respectivamente. La magnitud máxima de ΔT en esta franja horaria fue de 10.9°C. Además, en la franja 3, el punto P6 mostró la mayor prevalencia de valores de $\Delta T=0$, con un 76% de los datos, a diferencia de las franjas 1 y 2, en las cuales $\Delta T=0$ mayoritariamente en P4.

Para la franja horaria 4 (Figura 81b), la tendencia es similar a la de la franja 3. En la franja 3. En esta última, la desviación oscila entre 0.2°C y 2.1°C, mientras que en la franja 4 entre 0.5°C y 2.1°C (Tabla 19). Además, en la franja 4, se observa que en los puntos P6 y P8 las magnitudes de $\Delta T=0$ prevalecen en el 48% y 38% de los datos, respectivamente. Esta franja también muestra una tendencia positiva hasta el punto P8, donde la temperatura disminuye gradualmente a medida que se desciende en altura, seguido de un aumento adicional en el punto P10. El valor máximo de ΔT para esta franja horaria es de 9.5°C (Tabla 19), ubicado en el punto P1, el más alto de todos.

Figura

81

Gradientes térmicos verticales externos agrupados: (a) franja 3 y (b) franja 4.


Tabla
19

Valores de ΔT por cada punto de medición para las franjas 3 y 4.

Punto	3				4			
	Máximo	Mínimo	Promedio	Desviación	Máximo	Mínimo	Promedio	Desviación
1	10,9	0,9	6,4	2,1	8,5	0,0	3,6	2,1
2	9,7	0,4	5,9	1,8	7,4	0,0	3,6	1,8
3	9,1	0,3	5,5	1,6	7,0	0,0	3,3	1,6
4	3,5	0,0	1,4	0,8	5,1	0,0	2,0	1,0
5	2,3	0,0	0,9	0,4	3,5	0,0	0,9	0,6
6	0,9	0,0	0,1	0,2	3,5	0,0	0,3	0,5
7	1,7	0,2	1,0	0,3	4,6	0,0	0,5	0,6
8	1,8	0,0	0,5	0,4	4,0	0,0	0,4	0,6
9	4,8	1,0	2,6	0,7	4,0	0,0	1,2	0,6
10	6,0	0,0	3,4	0,9	4,9	0,3	1,9	0,8

Gradientes térmicos verticales internos.

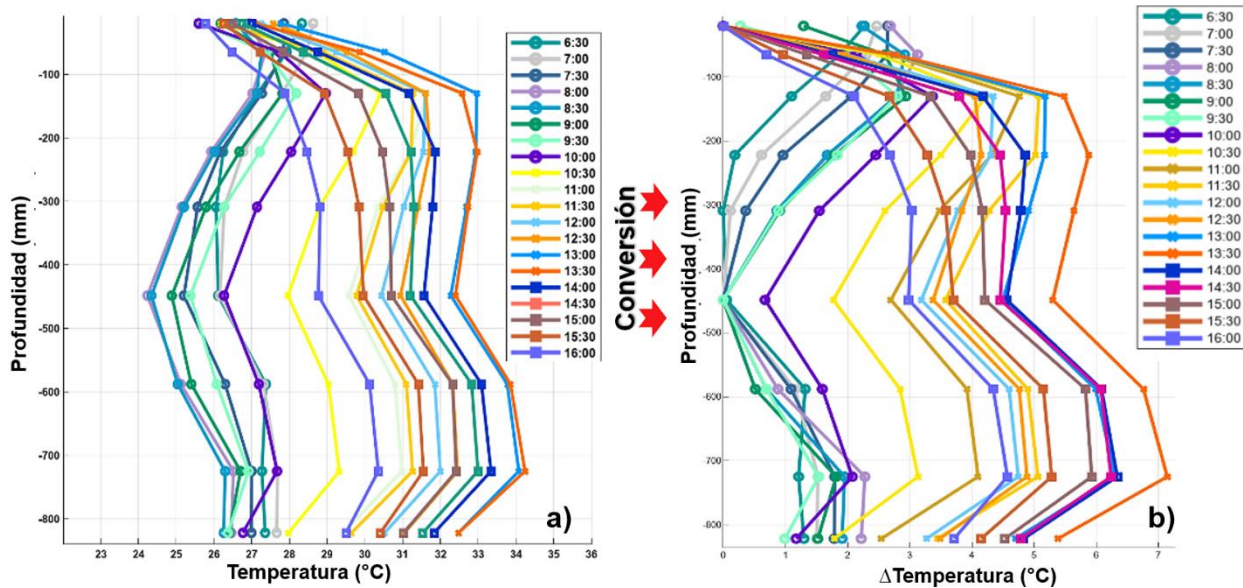
Se obtuvieron 1040 gradientes térmicos verticales (GTV) internos, con 20 GTV por día en promedio. Estos GTV representan la diferencia de temperatura (ΔT) en grados Celsius. En la Figura 82 se muestran todos los perfiles verticales de temperatura externa obtenidos el 23/09/2023 durante las 20 mediciones de ese día y sus respectivos GTV internos. Esta grafica es un ejemplo de cómo se visualizan los diversos GTV internos en un día de medición, determinados a partir de los perfiles de temperatura interna, con variaciones desde las 6:30 hasta las 16:00 horas. Al igual que para la temperatura externa, aquí se revelan los cambios térmicos que experimenta internamente la viga-losa en respuesta a las condiciones meteorológicas medidas de forma

sincrónica. Cada línea de color representa un momento específico y esto permite observar la evolución del GTV y la propagación del calor a través del material.

Así como para los gradientes externos, para los internos se identificaron tendencias generales a partir de agrupaciones de los resultados en franjas horarias representativas del fenómeno de estudio.

Figura 82

Variación térmica interna 23/09/2023: (a) perfiles verticales de temperatura y (b) GVT.



Franjas horarias de los GTV internos.

Las Figura 83 y Figura 84 muestran los gradientes obtenidos a partir de los perfiles verticales de temperatura interna, separados por franjas horarias. En todas las gráficas, los gradientes se representan en color gris, resaltándose el gradiente promedio correspondiente, además de la suma y resta de la desviación estándar.

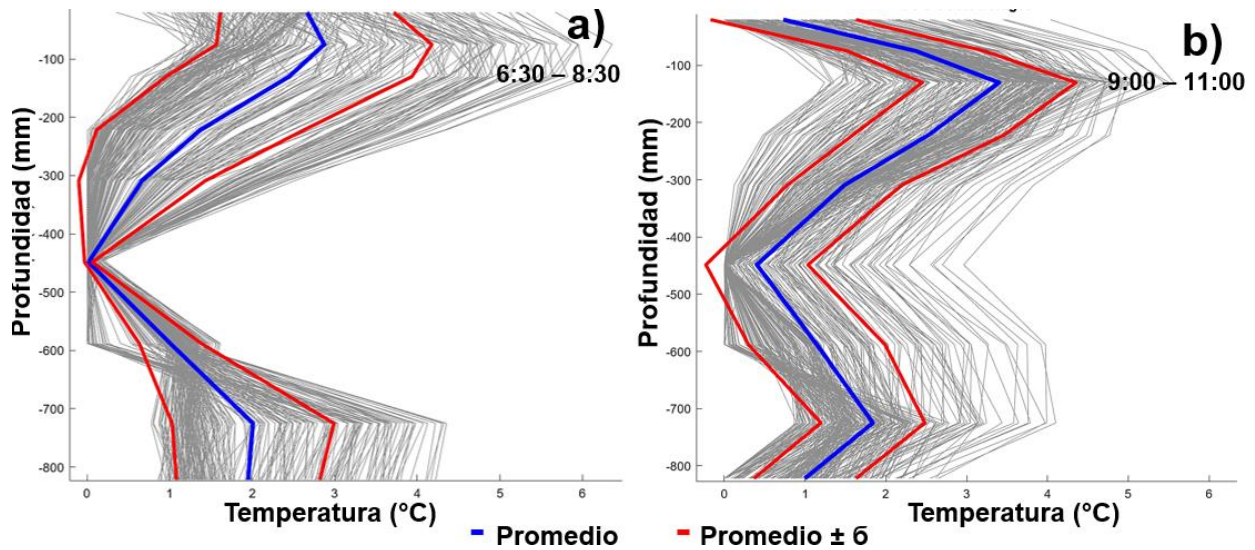
En la Figura 83a, correspondiente a la franja 1 (6:30-8:30), los gradientes térmicos verticales internos presentan una disminución progresiva de la temperatura desde P1 hasta P6, seguida de un incremento hacia la aleta inferior de la viga. Los valores más altos de ΔT se registran en la zona superior (región central de la losa), específicamente en P2 con un máximo de 6.4°C (Tabla 20) y un promedio de $2.9^{\circ}\text{C} (\pm 1.3^{\circ}\text{C})$. En todos los casos la temperatura alcanza su mínimo en P6 (449.5 mm de profundidad) donde el ΔT promedio es prácticamente nulo ($0.0^{\circ}\text{C} \pm 0.0^{\circ}\text{C}$), lo que indica una zona de estabilidad térmica.

Para la franja 2 (9:00-11:00), mostrada en la Figura 83b, se observa una mayor variabilidad en los gradientes con un patrón complejo: la temperatura aumenta en la región central de la losa hasta su contacto con el alma, alcanzando su máximo ΔT (Tabla 20) en P3 (5.6°C con un promedio de $3.4^{\circ}\text{C} \pm 1.0^{\circ}\text{C}$), luego disminuye hacia P6, donde se registra el menor ΔT promedio ($0.4^{\circ}\text{C} \pm 0.6^{\circ}\text{C}$), para posteriormente incrementar y decaer. Es notable que en esta franja horaria, 7 de los 9 puntos de medición presentan desviaciones estándar menores o iguales a 0.9°C , lo que sugiere una menor variabilidad temporal en comparación con la franja 1.

La comparación entre ambas franjas revela que la franja 1 experimenta valores de ΔT máximos en la zona superior (P1-P2), mientras que la franja 2 muestra sus máximos están en la zona intermedia superior (P2-P3), lo cual podría atribuirse al calentamiento progresivo de la estructura durante las horas de la mañana.

Figura 83

Gradientes térmicos verticales internos agrupados en (a) franja 1 y (b) franja 2.


Tabla
20

Valores de ΔT ($^{\circ}\text{C}$) por cada punto de medición para las franjas 1 y 2.

Punto	1				2			
	Máximo	Mínimo	Promedio	Desviación	Máximo	Mínimo	Promedio	Desviación
P1	5,7	0,4	2,7	1,1	4,0	0,0	0,7	0,9
P2	6,4	1,2	2,9	1,3	5,2	0,8	2,4	0,9
P3	6,1	0,5	2,4	1,5	5,6	1,2	3,4	1,0
P4	6,4	0,0	1,4	1,3	5,2	0,5	2,5	0,9
P5	4,3	0,0	0,7	0,8	4,8	0,1	1,5	0,7
P6	0,2	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,4	0,6
P7	1,6	0,0	1,0	0,4	4,0	0,0	1,1	0,8
P8	4,4	0,8	2,0	1,0	4,1	0,9	1,8	0,6
P9	4,2	0,9	2,0	0,9	2,6	0,0	1,0	0,6

Las franjas horarias 3 (11:30-13:30) y 4 (14:00-16:00) exhiben patrones térmicos similares, con algunas diferencias notables en la magnitud y distribución de los gradientes. En ambas franjas, el punto de referencia térmica común (P1) muestra los valores más bajos, con promedios de ΔT cercanos a 0°C ($0.0^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ para franja 3 y $0.1^{\circ}\text{C} \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ para franja 4).

En la franja 3 (Figura 84a), los gradientes muestran una distribución característica donde los máximos ΔT se concentran en la región inferior, específicamente (Tabla 21) en P8 (7.1°C máximo, $3.3^{\circ}\text{C} \pm 1.6^{\circ}\text{C}$ promedio). Se observa un patrón de incremento gradual desde P1 hacia

P8, con valores intermedios significativos en P3 ($3.4^{\circ}\text{C} \pm 1.2^{\circ}\text{C}$ promedio) y P4 ($3.3^{\circ}\text{C} \pm 1.3^{\circ}\text{C}$ promedio).

Para la franja 4 (Figura 84b), aunque mantiene una distribución similar, los ΔT máximos son ligeramente menores. El máximo ΔT (Tabla 23) también se registra en P8 (6.7°C máximo, $3.1^{\circ}\text{C} \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ promedio). Es notable que las desviaciones estándar en esta franja son consistentemente mayores en la región media-inferior (P4-P9), oscilando entre 1.3°C y 1.7°C , lo que indica una mayor variabilidad térmica durante este período.

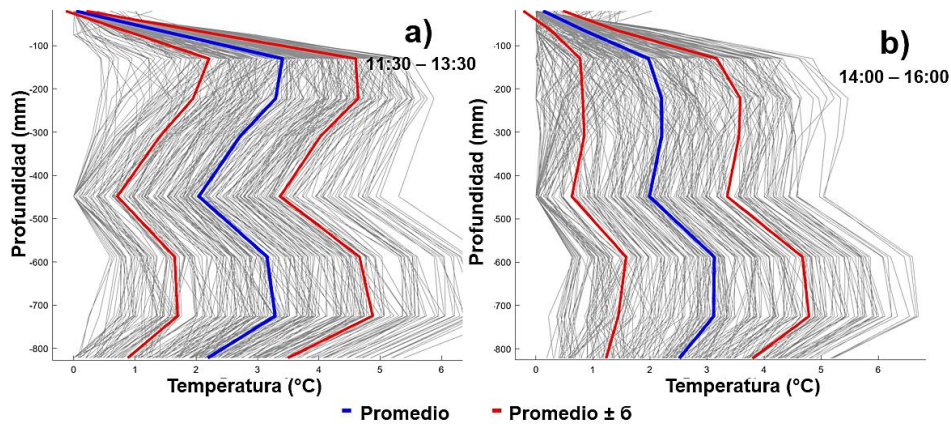
Comparando ambas franjas, se observa una consistencia en la ubicación de los máximos ΔT (P7-P8), con valores de ΔT promedio similares (3.2 - 3.3°C para franja 3 y 3.1°C para franja 4). Esta distribución coincide en general con los patrones descritos por Hagedorn et al. (2019) para viga-losas AASHTO tipos II y IV (

Figura 85), aunque con variaciones en las pendientes específicas y cambios de temperatura, atribuibles a las diferentes condiciones meteorológicas (estudio en Fayetteville, Arkansas, and Norman, Oklahoma, USA) y la extensión del período de estudio (intervalos de medición de diez minutos por nueve meses continuos). La presencia de la losa superior en el presente estudio, ausente en el análisis de Hagedorn, introduce un elemento significativo que altera la distribución térmica. Mientras Hagedorn reporta un gradiente que aumenta monótonicamente desde la parte superior (10.6°C) hasta la aleta inferior (17.8°C) en una viga I aislada, los datos de este estudio muestran un comportamiento complejo debido a la interacción térmica entre la losa y la viga. La zona de la losa actúa como un regulador térmico, lo que explica las menores magnitudes observadas (máximos de 7.1°C vs 17.8°C de Hagedorn) y la diferente distribución del gradiente. Esta configuración compuesta también explica en este estudio los máximos ΔT se concentran en

la región P7-P8, a diferencia del patrón lineal observado por Hagedorn, ya que la losa superior modifica significativamente la transferencia y acumulación de calor en la estructura. Es significativo que en ambas franjas (3 y 4), la región inferior (P7-P9) mantiene ΔT elevados y consistentes, lo cual sugiere una acumulación de calor en esta zona durante las horas de máxima radiación solar, mientras que la región superior (P1-P3) muestra una mayor sensibilidad a las variaciones térmicas del ambiente.

Figura 84

Gradientes térmicos verticales internos agrupados en (a) franja 3 y (b) franja 4.



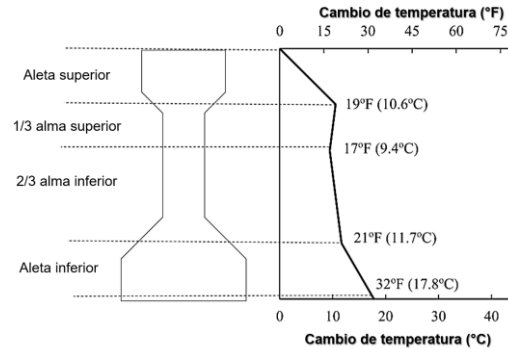
Tabla

Valores de ΔT (°C) por cada punto de medición para las franjas 3 y 4.

Franjas Punto	3				4			
	Máximo	Mínimo	Promedio	Desviación	Máximo	Mínimo	Promedio	Desviación
P1	1,3	0,0	0,0	0,2	2,0	0,0	0,1	0,3
P2	3,0	0,0	1,7	0,7	2,3	0,0	0,8	0,6
P3	5,5	0,4	3,4	1,2	4,8	0,0	2,0	1,2
P4	3,0	0,4	3,3	1,3	2,3	0,0	2,2	1,4
P5	5,9	0,3	2,7	1,3	5,5	0,1	2,2	1,4
P6	5,3	0,0	2,0	1,3	5,1	0,0	2,0	1,4
P7	6,8	0,6	3,2	1,5	6,6	0,6	3,1	1,5
P8	7,1	0,2	3,3	1,6	6,7	0,2	3,1	1,7
P9	5,4	0,0	2,2	1,3	5,2	0,2	2,5	1,3

Figura 85

Gradiente térmico vertical recomendado para viga AASHTO Tipo II y Tipo IV. Adaptado al español de Hagedorn et al. (2019).

**4.7. Correlación de datos.**

El estudio de la correlación entre los GTV y los perfiles de temperatura interna y externa de la viga-losa y las variables meteorológicas ofrece una visión analítica del comportamiento térmico del material bajo los efectos meteorológicos de la zona de estudio. Estos datos se correlacionaron entre sí y con las variables meteorológicas de tipo numéricas (temperatura ambiente, velocidad del viento, precipitación y radiación solar), excluyendo en la correlación la dirección del viento (variable de tipo categórica).

Correlación de gradientes térmicos verticales y perfiles de temperatura.

Dado que las variables de este estudio no se ajustaron a una distribución normal, se utilizó la correlación por rangos de Spearman, un método no paramétrico para cuantificar la relación entre los datos. Este método se basa en una asociación lineal que emplea los rangos, o números de orden, de cada grupo de sujetos para realizar la comparación (Martínez et al. , 2009).

La Tabla 22 muestra el coeficiente de correlación de Spearman (ρ) entre los valores de ΔT para las temperaturas internas y externas, punto a punto, calculados en la sec. 4.6. Los coeficientes de correlación se interpretan en términos de su significancia estadística, donde valores altos y positivos indican una relación directa fuerte, mientras que valores negativos sugieren una relación inversa. La significancia estadística de estos coeficientes está marcada con asteriscos, indicando el nivel de confianza en los resultados obtenidos. Se observa que existen correlaciones positivas y negativas siendo algunas de estas estadísticamente significativas. La correlación para las parejas de puntos P2-P2 y P3-P3 es fuerte y positiva, mientras que las parejas de puntos P6-P7 y P7-P8 es fuerte y negativa. Los valores cercanos a cero indican parejas de puntos donde la relación entre la magnitud de los ΔT interno y externo no es clara o débil. Esto ocurre en las parejas P1-P1 (-0.13***), P3-P4 (-0.16***), P4-P5 (-0.08*) y P9-P10 (-0.17***), que contienen puntos con magnitudes de ΔT iguales o cercanas a cero, lo que puede causar que no haya una distribución clara y que la correlación sea baja.

Tabla
22

Correlación de magnitudes de ΔT interno y externo.

<i>Ilustración</i>	<i>Parejas</i>	ρ	<i>Interpretación</i>
	P1-P1	-0.13***	Correlación negativa débil, pero estadísticamente significativa
	P2-P2	+0.65** *	Correlación positiva moderada fuerte y significativa
	P3-P3	+0.86** *	Fuerte correlación positiva y significativa
	P3-P4	-0.16***	Correlación negativa débil, pero estadísticamente significativa
	P4-P5	-0.08*	Ninguna correlación, marginalmente significativa
	P5-P6	-0.5***	Moderada fuerte correlación negativa y significativa
	P6-P7	-0.71***	Fuerte correlación negativa y significativa
	P7-P8	-0.84***	Fuerte correlación negativa y significativa
	P8-P9	-0.23***	Correlación negativa débil, pero significativa
	P9-P10	-0.17***	Correlación negativa débil, pero significativa

Nota: (*) significancia de 0.05; (**) significancia de 0.01; (***) significancia de 0.001.

Tras realizar las correlaciones entre los gradientes térmicos verticales, se obtuvieron valores con poca representatividad de la realidad física. Por ejemplo, la correlación en la zona superior (P1) arrojó un coeficiente de -0.13^{***} , un resultado contradictorio, ya que esta región está directamente influenciada por el mismo flujo de calor que otras partes de la estructura. Además, en la sección 4.5 (pág. 125) se observa que, para el día característico DS2, las temperaturas interna y externa ascienden de manera progresiva, aunque en proporciones diferentes, desde las 6:30 hasta las 13:00 horas, un comportamiento típico que se confirma al analizar las tendencias horarias de la temperatura externa (pág. 91) e interna (pág. 105). Este fenómeno se atribuye a factores como cambios en la distribución de los rangos de datos, pérdida o alteración de información relevante, eliminación de valores extremos significativos y la aplicación de transformaciones no lineales a los datos originales.

Por otro lado, al correlacionar punto a punto los valores de los perfiles de temperatura interna y externa (sin deducir el valor de temperatura de referencia) se obtienen valores representativos de la dinámica térmica del elemento utilizarse datos sin transformaciones. La Tabla 23 muestra el coeficiente de correlación de Spearman entre los perfiles de temperatura interna y externa punto a punto, en la cual se observa que la mayoría de las parejas muestran correlaciones positivas. Esto es, cuando la temperatura interna aumenta, la temperatura externa también lo hace. Específicamente las parejas P3-P3 ($+0.62^{***}$), P4-P5 ($+0.57^{***}$), P5-P6 ($+0.61^{***}$), y P6-P7 ($+0.49^{***}$) tienen las correlaciones más altas, sugiriendo una fuerte relación entre esos puntos respecto a su temperaturas internas y externas. P1-P1 tiene la correlación más baja ($+0.12^{***}$), lo que indica que factores como el viento, radiación e incluso el concreto circundante podrían estar afectando una o ambas respuestas térmicas. La significancia estadística en todos los puntos indica que las correlaciones observadas no son al azar y tienen un respaldo estadístico sólido.

Tabla 23
Correlación de perfiles verticales de temperatura externa e interna.

<i>Ilustración</i>	<i>Parejas</i>	ρ	<i>Interpretación</i>
	P1-P1	+0.12** *	Correlación positiva débil, pero estadísticamente significativa
	P2-P2	+0.42** *	Correlación positiva moderada y significativa
	P3-P3	+0.62** *	Fuerte correlación positiva y significativa
	P3*-P4	+0.36** *	Correlación positiva débil, pero significativa
	P4-P5	+0.57** *	Correlación positiva moderada fuerte, significativa
	P5-P6	+0.61** *	Fuerte correlación positiva y significativa
	P6-P7	+0.49** *	Correlación positiva moderada y significativa
	P7-P8	+0.35** *	Correlación positiva débil, pero significativa
	P8-P9	+0.41** *	Correlación positiva moderada y significativa
	P9-P10	+0.46** *	Correlación positiva moderada y significativa

Nota: (*) significancia de 0.05; (**) significancia de 0.01; (***) significancia de 0.001.

Para comparar los resultados de las correlaciones punto a punto entre gradientes (ΔT) y perfiles de temperatura, se debe tener en cuenta varios aspectos claves como los valores de correlación, la tendencia de las correlaciones (positivas o negativas) y la significancia estadística, como se resume en la Tabla 24. En esta se observa que la correlación entre los perfiles verticales de temperatura muestra una mayor consistencia en las correlaciones positivas, sugiriendo que las temperaturas internas y externas tienen una relación directa y predecible. En ambos casos hay alta significancia estadística en la mayoría de las correlaciones (90% para GTV y 100% para perfiles térmicos), pero la correlación de perfiles de temperatura proporciona una visión clara y consistente de la relación entre las respuesta interna y externa de la sección viga-losa.

Tabla 24

Comparación de los resultados de las correlaciones.

<i>Aspecto clave</i>	<i>Correlación entre gradientes</i>	<i>Correlación entre perfiles</i>
Valores de Correlación	<ul style="list-style-type: none"> • Presenta correlaciones positivas, negativas y cercanas a cero. • Los coeficientes más altos son 0.86 (P3-P3) y -0.84 (P7-P8), mostrando fuertes correlaciones tanto positivas como negativas. • Varias correlaciones negativas indican una relación inversa entre los gradientes externo e interno. 	<ul style="list-style-type: none"> • Muestra únicamente correlaciones positivas, variando de 0.12 a 0.62. • Los coeficientes más altos son 0.62 (P3-P3) y 0.61 (P5-P5), indicando una fuerte correlación positiva. • No hay correlaciones negativas, sugiriendo que las temperaturas internas y externas tienden a aumentar de forma conjunta en todos los puntos de medición.
Tendencias de Correlación	<ul style="list-style-type: none"> • La presencia de varias correlaciones negativas y bajas puede indicar inconsistencias en cómo los gradientes se relacionan en ciertos puntos. • Correlaciones negativas podrían sugerir que factores externos diferentes (como la sombra, la orientación, o la protección) influyen en ciertos puntos de medición. 	<ul style="list-style-type: none"> • Las correlaciones son todas positivas y varían en fuerza, indicando una relación más consistente y directa entre las temperaturas internas y externas. • La tendencia positiva sugiere que a medida que la temperatura externa aumenta, la interna también lo hace en la mayoría de los puntos medidos.
Significancia Estadística	<ul style="list-style-type: none"> • Varios coeficientes tienen alta significancia (***) , indicando que las correlaciones observadas son estadísticamente significativas, aunque algunas son negativas. • Algunas correlaciones cercanas a cero como P1-P1, P3-P4, P4-P5 y P9-P10, no muestran una relación clara entre los gradientes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Todas las correlaciones son estadísticamente significativas (***) , reforzando la fiabilidad de los datos. • La consistencia en la significancia sugiere que la relación observada entre las temperaturas internas y externas es robusta y menos afectada por variabilidad aleatoria.

Al usar los perfiles de temperatura se obtienen correlaciones positivas consistentes y estadísticamente significativas, proporcionando una base sólida para entender y modelar el comportamiento térmico de la viga. Dado que la correlación utilizando los perfiles de temperatura muestra una mayor consistencia, se continúa utilizando estos datos para definir los análisis de correlación por franjas horarias y con las variables meteorológicas.

Correlación de perfiles verticales de temperatura externa e interna por franjas horarias.

Este análisis se realizó con las franjas horarias definidas (Tabla 1). La Tabla 25 muestra esta correlación, dividiendo en cuatro franjas horarias el análisis.

En la franja horaria 1 (6:30 a 8:30 horas), las parejas ubicadas en la losa superior muestran una correlación positiva moderada, con el máximo coeficiente obtenido para P3-P3 ($\rho = 0.74$) indicando una relación significativa entre la temperatura externa e interna en las primeras horas de la mañana. En el alma de la viga-losa, se observan correlaciones tanto positivas significativas ($0.29 \leq \rho \leq 0.56$) como negativas (-0.24 y -0.35), lo que sugiere una respuesta térmica más compleja y posiblemente influenciada por factores adicionales en esta zona. En la aleta inferior (base), hay correlaciones positivas moderadas (0.48 y 0.55), sugiriendo una relación considerable entre las temperaturas.

Durante la franja 2 (9:00 a 11:00 horas), las magnitudes de las correlaciones en la losa superior son en general más bajas que las de Franja 1, especialmente en las parejas P1-P1 (0.18). P2-P2 y P3-P3 mantienen correlaciones moderadas (0.42 y 0.52). En el alma de la viga-losa se presentan correlaciones positivas ($0.64 \leq \rho \leq 0.57$), aunque P7-P8 tiene una correlación baja (0.11). En la base, hay correlaciones negativas en P8-P9 (-0.12), indicando posibles diferencias en el comportamiento térmico, y P9-P10 muestra una correlación casi nula (-0.059).

En la franja horaria 3 (11:30 a 13:30 horas), las correlaciones en la losa superior son bajas, especialmente en P1-P1 (0.024). P2-P2 y P3-P3 muestran correlaciones moderadas (0.23 y 0.41). En el alma de la viga-losa, se presentan correlaciones positivas moderadas ($0.41 \leq \rho \leq 0.5$), mientras que en la aleta inferior tienden a 0.4.

Para la última franja horaria (14:00 a 16:00 horas), la región en la losa muestra correlaciones bajas a moderadas ($0.11 \leq \rho \leq 0.49$), mientras que nuevamente las correlaciones son positivas y moderadas en el alma de la viga ($0.44 \leq \rho \leq 0.57$). En la aleta inferior las correlaciones son moderadas y están en torno a $\rho = 0.62$.

En términos generales, las correlaciones en la región en la losa son generalmente moderadas a altas durante las primeras horas del día, disminuyen al mediodía y aumentan ligeramente por la tarde. En el alma de la viga-losa, la correlación es mayormente positiva, con variabilidad a lo largo del día. P3-P4, P4-P5 y P5-P6 fueron consistentemente positivas en todas las franjas horarias y el alma fue la zona donde se presentaron las mayores magnitudes de correlación (ρ). P6-P7 y P7-P8 muestran un comportamiento menos predecible, con correlaciones negativas y bajas en varias franjas horarias. En la base de la viga-losa, las correlaciones son moderadas a lo largo del día, con una notable disminución en la Franja 2 para las parejas P8-P9 y P9-P10.

La Tabla 25 refleja una variabilidad significativa en la correlación entre las temperaturas internas y externas de la viga a lo largo del día. Los puntos de medición en la losa superior tienden a tener correlaciones consistentes, mientras que algunos puntos en el alma y la base muestran mayor variabilidad. Las franjas horarias reflejan la dinámica térmica diaria, con correlaciones generalmente más altas por la mañana y por la tarde, y más bajas al mediodía

Tabla 25

Valores de correlación de perfiles verticales de temperatura externa e interna.

	<i>Parejas</i>	ρ - Franja 1	ρ - Franja 2	ρ - Franja 3	ρ - Franja 4
<i>Losa superior</i>	<i>P1-P1</i>	+0.42***	+0.18***	+0.024	+0.11*
	<i>P2-P2</i>	+0.69***	+0.42***	+0.23***	+0.30***
	<i>P3-P3</i>	+0.74***	+0.52***	+0.41***	+0.49***
	<i>P3-P4</i>	+0.56***	+0.64***	+0.19**	+0.31***
<i>Alma</i>	<i>P4-P5</i>	+0.55***	+0.66***	+0.41***	+0.44***
	<i>P5-P6</i>	+0.29***	+0.57***	+0.44***	+0.48***
	<i>P6-P7</i>	-0.24***	+0.38***	+0.50***	+0.57***
	<i>P7-P8</i>	-0.35***	+0.11*	+0.40***	+0.54***
	<i>P8-P9</i>	+0.55***	-0.12*	+0.39***	+0.63***
<i>Base</i>	<i>P9-P10</i>	+0.48***	-0.059*	+0.41***	+0.62***

Nota: (*) significancia de 0.05; (**) significancia de 0.01; (***) significancia de 0.001.

Correlación de perfiles verticales de temperatura interna y las variables meteorológicas.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del análisis de la correlación entre la temperatura interna de la viga y las variables meteorológicas medidas durante el periodo de estudio. Los datos de temperatura interna en cada punto (P1 a P9) se correlacionaron con la temperatura ambiente, la radiación solar, la velocidad del viento y la precipitación, utilizando el coeficiente de correlación de Spearman (ρ) para evaluar la relación entre estas variables.

La Tabla 26 resume los coeficientes ρ para cada punto de medición interno con las variables meteorológicas estudiadas. Esta tabla permite observar la magnitud y la dirección de la relación entre la temperatura interna en diferentes puntos de la viga-losa y las condiciones ambientales externas.

Tabla 26

Valores de correlación de los perfiles verticales de temperatura interna y las variables meteorológicas.

<i>Punto interno</i>	<i>Temperatura ambiente</i>	<i>Radiación solar</i>	<i>Velocidad del viento</i>	<i>Precipitación</i>
<i>P1</i>	0.13***	0.24***	-0.043	-0.069*
<i>P2</i>	0.44***	0.60***	0.19***	-0.14***
<i>P3</i>	0.68***	0.75***	0.42***	-0.15***
<i>P4</i>	0.80***	0.77***	0.55***	-0.15***
<i>P5</i>	0.84***	0.72***	0.61***	-0.14***
<i>P6</i>	0.84***	0.64***	0.64***	-0.12***
<i>P7</i>	0.83***	0.61***	0.64***	-0.11***
<i>P8</i>	0.83***	0.70***	0.61***	-0.15***
<i>P9</i>	0.77***	0.62***	0.57***	-0.14***

Nota: (*) significancia de 0.05; (**) significancia de 0.01; (***) significancia de 0.001

En la Tabla 27 se detallan observaciones claves y tendencias generales derivadas de la correlación entre las variables meteorológicas y la temperatura interna en distintos puntos de la viga. La temperatura ambiente tiene una fuerte correlación positiva con la temperatura interna en la mayoría de los puntos, especialmente con la de los puntos P4 a P9 ($0.80 \leq \rho \leq 0.83$) que están

ubicados en el alma y en la aleta inferior. En cambio, la correlación es moderada a baja con los puntos más superficiales en la región central de la losa (P1 y P2). La radiación solar también muestra una fuerte correlación positiva con temperatura interna de la viga, particularmente con la de los puntos P3 a P5 ($0.72 \leq \rho \leq 0.75$), y correlaciones moderadas con la de P6 a P9. La velocidad del viento tiene una influencia positiva en la temperatura interna de la mayoría de los puntos (excepto para P1 en la región central de la losa), aunque la fuerza de la correlación es menor en comparación con las de la temperatura ambiente y la radiación solar. La precipitación tiene una correlación negativa con la temperatura interna, sugiriendo un efecto de enfriamiento en todos los puntos medidos. Esta tabla proporciona una visión clara de cómo las diferentes variables meteorológicas afectan la temperatura interna en diferentes puntos de la viga, con una alta fiabilidad estadística en la mayoría de las correlaciones observadas.

Tabla 27

Resumen de la correlación entre los perfiles verticales de temperatura interna y las variables meteorológicas.

<i>Aspecto clave</i>	<i>Temperatura ambiente</i>	<i>Radiación solar</i>	<i>Velocidad del viento</i>	<i>Precipitación</i>
Valores de Correlación	<ul style="list-style-type: none"> Los coeficientes varían desde 0.13 en P1 hasta 0.84 en P5 y P6. Todos los valores son positivos, indicando que a medida que la temperatura ambiente aumenta, la temperatura interna también tiende a aumentar. 	<ul style="list-style-type: none"> Los coeficientes varían desde 0.24 en P1 hasta 0.77 en P4. Todos los valores son positivos, lo que indica que un aumento en la radiación solar está asociado con un aumento en la temperatura interna. 	<ul style="list-style-type: none"> Los coeficientes varían desde -0.043 en P1 hasta 0.64 en P6, P7 y P9. La mayoría de los valores son positivos, excepto en P1 (-0.043). 	<ul style="list-style-type: none"> Los coeficientes varían desde -0.069 en P1 hasta -0.15 en P3, P4 y P9. Todos los valores son negativos, indicando que un aumento en la precipitación está asociado con una disminución en la temperatura interna.
Tendencias de Correlación	<ul style="list-style-type: none"> Los puntos P5, P6, P7, y P8 tienen las correlaciones más altas (0.83 a 0.84), lo que sugiere una fuerte relación entre la temperatura ambiente y la 	<ul style="list-style-type: none"> Los puntos P3, P4, y P5 tienen las correlaciones más altas (0.75 a 0.77), lo que sugiere que estos puntos están más influenciados 	<ul style="list-style-type: none"> La relación positiva sugiere que un aumento en la velocidad del viento está asociado con un aumento en la temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> Las correlaciones negativas sugieren que la lluvia tiene un efecto de enfriamiento en la temperatura interna.

<i>Aspecto clave</i>	<i>Temperatura ambiente</i>	<i>Radiación solar</i>	<i>Velocidad del viento</i>	<i>Precipitación</i>
	<i>temperatura interna en estos puntos.</i>	<i>por la radiación solar.</i>	<i>interna en la mayoría de los puntos.</i>	<i>Los puntos P3, P4, y P8 tienen las correlaciones negativas más altas (-0.15), indicando que estos puntos son más sensibles a la precipitación.</i>
Significancia Estadística	<ul style="list-style-type: none"> <i>Todos los coeficientes son estadísticamente significativos (**), lo que indica que las correlaciones observadas son fiables y no debidas al azar.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> <i>Todos los coeficientes son estadísticamente significativos (**), indicando la fiabilidad de estas correlaciones.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> <i>El punto P1 muestra una relación negativa baja, sugiriendo una influencia mínima e inversa del viento en la temperatura interna en este punto</i> <i>Excepto P1, todos los coeficientes son estadísticamente significativos (**), indicando que las correlaciones son fiables.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> <i>Todos los coeficientes son estadísticamente significativos, aunque P1 tiene una significancia menor (*).</i>

Correlación de perfiles verticales de temperatura interna y variables meteorológicas por franjas horarias

En las Tabla 28 a Tabla 31, se presentan los coeficientes de correlación de Spearman (ρ) entre los perfiles verticales de temperatura interna y las cuatro variables meteorológicas divididos en cuatro franjas horarias.

Para la franja 1 (6:30 - 8:30 horas) la Tabla 28 muestra la losa con una correlación positiva moderada de P1 con la temperatura ambiente ($\rho = 0.54$) y radiación solar ($\rho = 0.36$), mientras que P2 y P3 exhiben correlaciones más altas, alcanzando valores de $0.76 \leq \rho \leq 0.77$ respectivamente con la temperatura ambiente de $0.66 \leq \rho \leq 0.71$ con la radiación solar. En el alma, los puntos P4 y P5 presentan también correlaciones altas con la temperatura ambiente, con valores que van de $0.58 \leq \rho \leq 0.77$, y correlaciones moderadas con la radiación solar. En cambio, P6 muestra correlaciones bajas con todas las variables meteorológicas. En la base, el punto P9 tiene correlaciones moderadas con la temperatura ambiente ($\rho = 0.66$) y la radiación solar ($\rho = 0.5$). Esto sugiere que la base

responde de forma menos intensa a las variaciones en las variables meteorológicas en comparación con otras zonas de la estructura.

Tabla**28**

Correlación de los perfiles verticales de temperatura interna y variables meteorológicas – franja horaria 1.

Punto interno	Temperatura ambiente	Radiación solar	Velocidad del viento	Precipitación
P1	+0.54***	+0.36***	+0.11*	-0.23***
P2	+0.76***	+0.66***	+0.16*	-0.25***
P3	+0.81***	+0.75***	+0.16**	-0.26***
P4	+0.77***	+0.71***	+0.16**	-0.25***
P5	+0.59***	+0.49***	+0.17**	-0.23***
P6	+0.078	-0.064	+0.14*	-0.15*
P7	-0.08	-0.25	+0.062	-0.12*
P8	+0.73***	+0.59***	+0.17**	-0.25***
P9	+0.66***	+0.50***	+0.18**	-0.24***

Nota: (*) significancia de 0.05; (**) significancia de 0.01; (***) significancia de 0.001

Durante la franja 2 (9:00 - 11:00 horas), las correlaciones (Tabla 29) en la región central de la losa disminuyen respecto a la franja anterior. P1 presenta correlaciones bajas con todas las variables, mientras que P2 y P3 tienen correlaciones moderadas con la temperatura ambiente y la radiación solar ($0.59 \leq \rho \leq 0.37$, respectivamente). En el alma, P4 alcanza una correlación alta con la temperatura ambiente ($\rho = 0.80$) y una moderada con la radiación solar ($\rho = 0.53$). P5, P7 y P8 también mantienen correlaciones moderadas a altas con las variables meteorológicas, mientras que P6 se mantiene en un rango moderado. En la base, el punto P9 presenta correlaciones moderadas con todas las variables.

Tabla 29

Correlación de los perfiles verticales de temperatura interna y variables meteorológicas – franja

2.

Punto interno	Temperatura ambiente	Radiación solar	Velocidad del viento	Precipitación
P1	+0.35***	+0.098	+0.21***	-0.11
P2	+0.59***	+0.37***	+0.31***	-0.13*
P3	+0.74***	+0.50***	+0.40***	-0.14*
P4	+0.80***	+0.53***	+0.44***	-0.14*
P5	+0.75***	+0.47***	+0.44***	-0.14*
P6	+0.67***	+0.39***	-0.41***	-0.12*
P7	+0.63***	+0.36***	+0.40***	-0.11*
P8	+0.58***	+0.35***	+0.40***	-0.11*
P9	+0.45***	+0.22***	+0.33***	-0.11*

Nota: (*) significancia de 0.05; (**) significancia de 0.01; (***) significancia de 0.001

Para la franja 3 (11:30 - 13:30 horas), los valores de correlación (Tabla 30) en la región central de la losa muestra una tendencia baja en las correlaciones con las variables meteorológicas, siendo especialmente bajas en P1, con valores casi nulos respecto a la radiación solar y la velocidad del viento. En cambio, P2 y P3 mantienen correlaciones moderadas con la temperatura ambiente y la radiación solar. En el alma, las correlaciones son más consistentes: P4, P5, P6, y P7 muestran correlaciones de moderadas a altas con la temperatura ambiente y la radiación solar, alcanzando P7 el valor más alto con la temperatura ($\rho = 0.70$) y radiación solar ($\rho = 0.51$). P8 también muestra correlaciones moderadas con todas las variables. En la base, el punto P9 sigue mostrando una correlación alta con la temperatura ambiente ($\rho = 0.6$) y la radiación solar ($\rho = 0.45$).

Tabla 30

Correlación de los perfiles verticales de temperatura interna y variables meteorológicas – franja

3.

Punto interno	Temperatura ambiente	Radiación solar	Velocidad del viento	Precipitación
P1	+0.053	-0.093	-0.058	+0.049
P2	+0.35***	+0.25***	+0.082	-0.10
P3	+0.54***	+0.40***	+0.20**	-0.17**
P4	+0.65***	+0.46***	+0.25	-0.18**
P5	+0.66***	+0.46***	+0.31***	-0.18**
P6	+0.66***	+0.45***	+0.34***	-0.18
P7	+0.70***	+0.51***	+0.36***	-0.18***
P8	+0.68***	+0.54***	+0.34***	-0.19**
P9	+0.60***	+0.45***	+0.31***	-0.18*

Nota: (*) significancia de 0.05; (**) significancia de 0.01; (***) significancia de 0.001

Por último, en la franja 4 (14:00 - 16:00 horas), las correlaciones (Tabla 31) en la región central de la losa son más variadas. P1 presenta correlaciones bajas a moderadas con la temperatura ambiente y radiación solar, mientras que P2 y P3 muestran correlaciones moderadas de $0.51 \leq \rho \leq 0.68$ con la temperatura ambiente, respectivamente, y alrededor de $\rho = 0.63$ con la radiación solar. En el alma, las correlaciones con la temperatura ambiente y radiación solar se mantienen altas en todos los puntos, con valores que van de $0.63 \leq \rho \leq 0.80$, destacando P6 con la mayor correlación en esta franja. En la base, el punto P9 exhibe correlaciones altas con todas las variables, lo que indica una influencia sostenida de las condiciones meteorológicas en esta última franja del día.

Tabla 31

Correlación de los perfiles verticales de temperatura interna y variables meteorológicas – franja

4.

Punto interno	Temperatura ambiente	Radiación solar	Velocidad del viento	Precipitación
P1	+0.26***	+0.20***	-0.067	+0.0031
P2	+0.51***	+0.48***	+0.092	-0.11
P3	+0.68***	+0.63***	+0.26***	-0.15*
P4	+0.75***	+0.65***	+0.35***	-0.15*
P5	+0.78***	+0.64***	+0.38***	-0.15*
P6	+0.80***	+0.63***	+0.41***	-0.14*
P7	+0.82***	+0.65***	+0.42***	-0.14*
P8	+0.82***	+0.69***	+0.42***	-0.14*
P9	+0.78***	+0.62***	+0.39***	-0.13*

Nota: (*) significancia de 0.05; (**) significancia de 0.01; (***) significancia de 0.001

La temperatura ambiente muestra una alta correlación con las temperaturas internas en casi todas las franjas horarias y puntos de medición, lo que evidencia su fuerte influencia en el comportamiento térmico de la estructura. La radiación solar también presenta una correlación significativa con las temperaturas internas, especialmente durante las franjas horarias 1 y 4, cuando el ángulo de incidencia solar es más oblicuo. En contraste, la velocidad del viento y la precipitación tienen correlaciones más bajas y variables con la temperatura interna, indicando que su impacto en el calentamiento de la estructura es considerablemente menor en comparación con la temperatura ambiente y la radiación solar.

5. Conclusiones

En este estudio se determinaron experimentalmente los perfiles térmicos verticales y los gradientes térmicos verticales, internos y superficiales, en el eje central de la sección transversal de una viga compuesta (viga-losa) de concreto reforzado, bajo las condiciones climáticas específicas de Bucaramanga. Los resultados permitieron identificar patrones térmicos diferenciados en la sección del elemento, evidenciando cómo las variaciones meteorológicas y la misma geometría de la sección afectan su respuesta térmica. Las principales conclusiones obtenidas a partir de los resultados son:

1. A partir del sistema de monitoreo de contacto empleado (termopares embebidos en la sección), se identificaron temperaturas internas que varían según la profundidad de la sección transversal. Estas temperaturas se analizaron mediante perfiles de temperatura y gradientes térmicos, que en la zona central de la losa de la viga presentaron mayores variaciones térmicas debido a su exposición directa al flujo de calor, mientras que las zonas del alma y la aleta inferior mostraron un comportamiento con menores fluctuaciones, reflejando la propagación del calor desde la superficie externa hacia el interior.

2. Mediante el uso de un sistema de monitoreo sin contacto (cámaras termográficas integradas a un VANT o portátil), se definieron los perfiles de temperatura externa y gradientes térmicos. Los resultados mostraron mayores variaciones térmicas en la región de la losa y en la cara ESTE, especialmente durante las franjas horarias del mediodía, debido a la incidencia directa de la radiación solar. Estas mediciones proporcionaron una representación precisa y continua de las temperaturas externas en la estructura.

3. La variación de los perfiles y gradientes térmicos internos a lo largo del día mostraron una evolución clara influenciada por el ciclo solar diario. Durante la franja horaria 1 (6:30 a 8:30

horas), las temperaturas internas incrementan de forma gradual, con diferencias térmicas marcadas entre región central de la losa y la zona media e inferior, debido al inicio de la exposición solar y baja magnitud de la radiación solar (generalmente inferior a 300 W/m^2). En la franja 2 (8:30 a 11:30 horas), la temperatura interna continúa aumentando, evidenciando una mayor propagación del calor hacia la zona del alma, aunque la zona de la losa permaneció como la región con mayor variabilidad. Este comportamiento refleja el efecto acumulativo de la radiación solar directa durante la mañana. En la franja 3 (11:30 a 13:30 horas), se alcanzan los valores máximos perfiles de temperatura interna y externa y de gradientes térmicos durante cada día de medición, particularmente en la losa, mientras que en el alma y aleta inferior muestran una menor respuesta debido al retraso térmico en la transferencia de calor, además que estas dos zonas se encontraban en sombra y con una menor incidencia de la radiación solar directa que en la losa. Esta franja representa el momento de mayor impacto del ciclo solar sobre la estructura. Finalmente, en la franja 4 (13:30 a 15:30 horas), ocurre el descenso gradual en los perfiles térmicos internos, con un nivel más uniforme entre las tres zonas (losa, alma y aleta inferior), dado que la radiación solar disminuye y el calor acumulado en la viga se redistribuye internamente.

4. Por otro lado, la temperatura externa en algunos días sigue la tendencia de la temperatura interna, sin embargo, en diversos casos esta tiende a aumentar principalmente por la influencia de las condiciones meteorológicas. Estos resultados muestran cómo las características térmicas de cada franja horaria están directamente influenciadas por la posición del sol y la dinámica de transferencia de calor dentro del material, destacando la importancia de considerar estas variaciones temporales en futuros análisis estructurales y diseños.

5. El análisis del efecto del viento en la respuesta térmica interna y externa de la viga-losa reveló resultados contrastantes dependiendo del conjunto de datos y las condiciones específicas

del día. Si bien la correlación entre la velocidad del viento y las temperaturas internas no fue significativamente fuerte para el total de los datos registrados, un análisis detallado en días clave evidenció su impacto relevante. En días con condiciones meteorológicas características (eventos meteorológicos máximos, mínimos o prologandos), se observó que el viento influye notablemente en las temperaturas superficiales (externas), actuando como un moderador térmico que reduce las temperaturas máximas alcanzadas durante las franjas horarias de mayor radiación solar. Este efecto se debe al intercambio convectivo que enfría las superficies expuestas. Internamente, aunque el impacto del viento es menos directo, su efecto sobre las temperaturas externas tiene un papel indirecto, pues reduce el calor que se transfiere hacia las capas internas de la viga-losa. Este comportamiento fue más evidente en días con velocidades de viento más constantes, especialmente durante la franja horaria 3, cuando las temperaturas externas alcanzan sus picos. Con esto se destaca la necesidad de considerar el efecto del viento en la modelación térmica de estructuras expuestas, ya que su influencia puede modificar de manera significativa los perfiles térmicos externos e internos, particularmente bajo condiciones climáticas específicas o extremas y que en este caso solo hubo presencia de brisas suaves y ventolinas (con velocidades inferiores 1.5 m/s) provenientes principalmente del norte.

6. Las correlaciones entre los perfiles de temperatura interna y las variables meteorológicas mostraron que la temperatura ambiente y la radiación solar son las más influyentes en el comportamiento térmico de la viga. Sin embargo, se observaron inconsistencias en ciertas zonas de la sección, como en el alma de la viga, donde se presentaron tanto correlaciones positivas como negativas, lo que evidencia una complejidad térmica influenciada, además, por las propiedades del material y la configuración geométrica de la sección.

7. Las correlaciones entre los perfiles internos y externos mostraron una relación directa entre las temperaturas registradas en la superficie y las capas internas de la viga-losa. Sin embargo, estas correlaciones variaron a lo largo del día y entre franjas horarias, siendo mayores en las primeras franjas horarias (1 y 2), donde el calor de la radiación solar comenzaba a propagarse hacia el interior. En las franjas horarias posteriores (3 y 4), las correlaciones disminuyeron debido a la mayor influencia de la inercia térmica del concreto, que atenúa la respuesta interna respecto a los cambios externos. Además, la relación entre perfiles fue más consistente en la losa y el alma de la viga, mientras que las zonas inferiores presentaron una mayor variabilidad debido al efecto acumulado del calor, al aislamiento térmico natural proporcionado por el concreto y también a la presencia de radiación solar reflejada por el área circundante, esta última no fue medida por la estación meteorológica pero su efecto fue minimizado al implementarse el recubrimiento en la placa de la terraza con la polisombra verde (Figura 16).

8. El análisis de los gradientes térmicos reveló correlaciones predominantemente bajas y negativas entre las mediciones internas y externas. Estas variaciones están afectadas por múltiples factores: la posición de la temperatura de referencia (punto donde $\Delta T=0$), los cambios en la distribución de los rangos de datos debido a las transformaciones aplicadas, la eliminación de valores extremos significativos, y el uso de transformaciones no lineales en los datos originales. Aunque estas condiciones dificultaron establecer una relación uniforme entre los gradientes, las correlaciones obtenidas entre los perfiles de temperatura interna y externa, basadas en datos experimentales, resultaron representativas del comportamiento físico real del fenómeno, permitiendo extrapolar lo que debería observarse en los gradientes.

9. Durante el análisis se identificaron tres zonas térmicas diferenciadas en la sección viga-losa:

Zona superior (a -300 mm, medida desde la superficie de la losa): se caracterizó por una mayor variabilidad térmica debido a la exposición directa al sol.

Zona media (-300 a -600 mm, medida desde la superficie de la losa): reflejó una transición térmica con variaciones más graduales que en la zona superior.

Zona inferior (-600 a -800 mm, medida desde la superficie de la losa): mostró una tendencia hacia la estabilización, indicando un retraso en la propagación del calor a través de la profundidad.

10. El VANT capturó adecuadamente el ciclo térmico diario de la superficie de la viga-losa, aunque con diferencias en precisión y variabilidad respecto a la cámara portátil. La cámara portátil, al realizar mediciones localizadas, mostró menor dispersión y perfiles de temperatura más estables. Por otro lado, la cámara térmica integrada en el VANT presentó mayor variabilidad debido a la cobertura de áreas más amplias, lo que resultó en perfiles de temperatura más variables y rangos mayores, reflejando la influencia de factores ambientales y metodológicos en las mediciones. Ambos equipos, junto con la estación meteorológica, pueden integrarse a un sistema de monitoreo estructural para monitorear, con suficiente precisión, la respuesta térmica externa de vigas de puentes. Este enfoque proporcionará una herramienta robusta para capturar tanto la variabilidad como la precisión necesaria en el análisis térmico de estructuras expuestas a condiciones meteorológicas cambiantes.

11. Todos los datos recopilados de temperatura interna, superficial y variables meteorológicas no siguieron una distribución normal, lo que refleja la complejidad de las condiciones térmicas en la estructura. Esta variabilidad está influenciada por las fluctuaciones ambientales, la heterogeneidad del concreto y posibles limitaciones tecnológicas en los dispositivos de medición.

12. El análisis del gradiente térmico interno y externo de la viga-losa evidenció que ambos dependen de la posición de la temperatura de referencia, definida en este trabajo como aquella

donde el cambio de temperatura (ΔT) es igual a cero. Este punto de referencia, determinado experimentalmente, no se ubicó consistentemente en una región del alma de la viga, como lo establece el CCP-14. En cambio, su posición varió dependiendo del comportamiento de los datos en cada instante de medición. En el caso del gradiente interno, la posición de $\Delta T = 0$ tendió a desplazarse hacia la parte superior de la viga durante las horas de mayor radiación (franja 3). Esto sugiere que el calor superficial se propaga de manera más intensa hacia las capas superiores, desplazando el equilibrio térmico hacia áreas más profundas. Para el gradiente externo, el punto de referencia ($\Delta T = 0$) se ubicó en puntos más diversos del alma, dado que las temperaturas externas estuvieron más influenciadas por el ciclo solar diario.

13. Comparando los resultados experimentales obtenidos para el eje central de la sección con el gradiente térmico definido en CCP-14, que define el valor de $\Delta T=0$ en la zona del alma para el gradiente térmico interno, se identificó una discrepancia significativa. Este desajuste puede atribuirse a las diferencias en las condiciones climáticas locales de Bucaramanga, como la alta radiación solar y las variaciones diarias de temperatura ambiente, que afectan tanto la distribución térmica como el equilibrio interno de la viga-losa, y, principalmente, al hecho de que solo se analizaron las temperaturas a lo largo del eje central de la sección, excluyendo las temperaturas a lo ancho de la losa.

14. Los perfiles de temperatura internos y externos son comparables tanto en forma como en magnitud, ya que se obtuvieron directamente a partir de mediciones experimentales realizadas sobre el mismo material y en las mismas condiciones. Sin embargo, los gradientes térmicos no son directamente comparables, ya que para su cálculo se utilizó una transformación que implicó restar una temperatura de referencia. Esta diferencia metodológica introduce una dependencia en el resultado, dificultando su comparación. Para lograr una comparación más consistente entre

gradientes, se recomienda utilizar un punto de referencia fijo o un valor de ΔT constante en los cálculos.

Estos hallazgos subrayan la importancia de considerar las condiciones locales para ajustar los modelos normativos de gradientes térmicos. Además, recalcan la necesidad de realizar más estudios experimentales para validar o adaptar las posiciones normativas del punto de referencia térmica en estructuras sometidas a condiciones específicas. Aunque este estudio no evaluó esfuerzos ni deformaciones, se resalta la relevancia de incluir el gradiente térmico vertical en el análisis y diseño estructural, especialmente de estructuras hiperestáticas, y la necesidad de instrumentar interna y externamente las estructuras para su monitoreo. Esta instrumentación permitirá evaluar de manera precisa el impacto de las condiciones climáticas locales, proporcionando datos fundamentales para mejorar la comprensión de la transferencia de calor en condiciones climáticas específicas, ajustar los diseños estructurales y planificar estrategias de mantenimiento preventivo que aseguren la integridad y durabilidad de las estructuras a largo plazo, todo esto en el marco de los efectos del cambio climático que experimentamos.

El uso del VANT demostró ser una herramienta eficiente y precisa, con el potencial de ser aplicado en estudios térmicos de puentes en operación, permitiendo la evaluación directa de su comportamiento térmico en condiciones reales. Finalmente, se recomienda la realización de estudios más profundos que incluyan el desarrollo y aplicación de métodos numéricos avanzados o técnicas de inteligencia artificial para predecir y modelar con mayor precisión los gradientes térmicos en estructuras de concreto, contribuyendo a la optimización de diseños y estrategias de mantenimiento.

Referencias Bibliográficas

- AASHTO. (2012). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (6th Edition, 2012)* (6t ed.).
- Abid, S. R., & Özakça, M. (2020). Temperature records in concrete box-girder segment subjected to solar radiation and air temperature changes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 870(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/870/1/012074>
- Abid, S. R., Özakça, M., & Taysi, N. (2020). Temperature records in concrete box-girder segment subjected to solar radiation and air temperature changes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 870(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/870/1/012074>
- Abid, S. R., Tayşi, N., Özakça, M., Xue, J., & Briseghella, B. (2021). Finite element thermo-mechanical analysis of concrete box-girders. *Structures*, 33, 2424–2444. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.009>
- Agüero, M. B. (2020). *Comparación de mediciones* [Dpto. de Física, FCEyN, UBA]. http://materias.df.uba.ar/eyob2022c2/files/2022/09/Comparacion_de_mediciones_mediciones.pdf
- AIS. (2014). *Norma Colombiana de Diseño de Puentes - LRFD - CCP 14. SECCIÓN 3*.
- AMB. (2010). *Bucaramanga* . <https://www.amb.gov.co/bucaramanga/>
- Ariza, M. (2024). *Apoyo en el diseño y construcción de un segmento de viga I y tomas y procesamiento de datos de temperatura de un espécimen de concreto dentro del proyecto VIE-UIS 2823* [Universidad Industrial de Santander]. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/15589>
- Arredondo, F. (1981). “*Características térmicas del hormigón*”. *Cuestiones térmicas en recintos de hormigón*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Santander.

- ConectaPyme. (2023). *Transformación de Datos: Cómo limpiar y transformar tus datos para su posterior análisis*. <https://www.conectapyme.com/blog/transformacion-de-datos-como-limpiar-y-transformar-tus-datos-para-su-posterior-analisis/>
- DATAtab Team. (2024). Correlación de Spearman. En *DATAtab: Online Statistics Calculator*. DATAtab e.U. Graz, Austria. <https://datatab.es/tutorial/spearman-correlation>
- Davis Instruments. (2021). *Cabled Vantage Pro2™ & Vantage Pro2 Plus™ Stations*. https://cdn.shopify.com/s/files/1/0515/5992/3873/files/6152c_6162c_ss.pdf?v=1623783718
- Distron. (2023). *Qué es una cámara termográfica y para qué sirve*. <https://distrion.es/camara-termografica/>
- DJI. (2020). *DJI Mavic 2 Enterprise Advanced*. <https://modelforce.eu/en/product/dji-mavic-2-enterprise-advanced/>
- EN 1991-1-5. (2003). *Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-5: General actions - Thermal actions*.
- Exchange-Rates.org. (2024). *Historial 2022 del tipo de cambio de la libra esterlina (GBP) al peso colombiano (COP)*. <https://www.exchange-rates.org/es/historial/gbp-cop-2022>
- Fluke. (2023). *Cámaras termográficas | Cámaras termográficas de infrarrojos*. <https://www.fluke.com/es-es/productos/camara-termografica>
- Fluke Calibration. (2020). *2638A Hydra Series III Data Acquisition System/Digital Multimeter*. <https://us.flukecal.com/print/products/data-acquisition-and-test-equipment/data-acquisition/2638a-hydra-series-iii-data-acquisitio>
- Fritz, A., & Ubilla, M. (2012). *Manual de diseño*. chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcglclefindmkaj/<https://www.madera21.cl/wp-content/uploads/2016/11/4.Manual-de-dise%C3%B1o.-Construcci%C3%B3n-montaje-y-aplicaci%C3%B3n-de-envolventes-para-la-vivienda-de-madera-2012.pdf>

- Gonzalez, F. (1981). “*Campo térmico en obras de hormigón: Ecuaciones de recinto y condiciones de contorno*” *Cuestiones térmicas n recintos de hormigon.* . Universidad de Santander.
- González, Y., Ulloa, D., & Iglesias, I. (2013). Modelación del flujo de radiación solar global incidente sobre la superficie terrestre, para condiciones de cielo despejado. *Revista cubana de meteorología*, 19(1), 44–56. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=701978384005>
- Hagedorn, R., Martí-Vargas, J. R., Dang, C. N., Micah Hale, W., & Floyd, R. W. (2019). *Temperature Gradients in Bridge Concrete I-Girders under Heat Wave*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943)
- Hoffman, P. C., McClure, R. M., & West, H. H. (1983). Temperature Study of an Experimental Segmental Concrete Bridge. *PCI JOURNAL*, 78–97.
- IDEAM. (2012). *CARACTERÍSTICAS DE LA RADIACIÓN SOLAR* . <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/caracteristicas-de-la-radiacion-solar>
- IDEAM. (2017). *Atlas de viento de Colombia*. <https://goo.gl/6FNmig>
- IECA. (2018). *Preguntas y respuestas sobre la inercia térmica* [Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones]. <https://www.ieca.es/wp-content/uploads/2018/01/Preguntas-y-respuestas-sobre-la-inercia-termica.pdf>
- Imbsen, R. A., & Vandershaf, D. E. (1985). Thermal Effects in Concrete Bridge Superstructures. *Transportation Research Record*, 101–113.
- Johnson, J. K. (2005). *CONCRETE BRIDGE DECK BEHAVIOR UNDER THERMAL LOADS* [MONTANA STATE UNIVERSITY]. <https://es.scribd.com/document/274406768/10-1-1-232-1262>

- Kulprapha, N., & Warnitchai, P. (2012). Structural health monitoring of continuous prestressed concrete bridges using ambient thermal responses. *Engineering Structures*, 40, 20–38. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2012.02.001>
- Lee, J.-H. (2012). Investigation of Extreme Environmental Conditions and Design Thermal Gradients during Construction for Prestressed Concrete Bridge Girders. *Journal of Bridge Engineering*, 17(3), 547–556. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000277](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000277)
- Lee, Y. H., Amran, M., Lee, Y. Y., Kueh, A. B. H., Kiew, S. F., Fediuk, R., Vatin, N., & Vasilev, Y. (2021). Thermal behavior and energy efficiency of modified concretes in the tropical climate: A systemic review. En *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Número 21). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su132111957>
- Martínez, M., Tuya, L., Martínez, M., Pérez, A., & Cánovas, A. (2009). EL COEFICIENTE DE CORRELACION DE LOS RANGOS DE SPEARMAN CARACTERIZACION. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8(2). <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180414044017>
- MathWorks. (2024). *Simulink® Check™ Support Package for CI/CD Automation for Simulink® Check™ User's Guide*. <https://www.mathworks.com/content/dam/mathworks/mathworks-dot-com/hardware-support/files/ci-cd-automation-simulink-check-support-package.pdf>
- Mirambell, E. (1987). *Criterios de diseño en puentes de hormigón frente a la acción térmica ambiental [Tesis de doctorado no publicada]* [UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93229>
- Mondragón, M. (2014). USO DE LA CORRELACIÓN DE SPEARMAN EN UN ESTUDIO DE INTERVENCIÓN EN FISIOTERAPIA. *Movimiento Científico*, 8, 98–104.
- Morcelle, P. (2018). *Transductores - Instrumentación* [Universidad Nacional de La Plata]. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/69655>

- Moreno, W. (2024). *Apoyo en la construcción de una viga e implementación de una red neuronal con aprendizaje híbrido para estimar temperaturas en el concreto en el marco del proyecto de investigación VIE-UIS 2823* [Universidad Industrial de Santander].
<https://noesis.uis.edu.co/items/d38b114d-60a9-47d5-a0cc-d49fce1841e1>
- Mussa, F., Abid, S. R., & Tayşi, N. (2020). Winter temperature measurements in a composite girder segment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 888(1).
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/888/1/012074>
- Neville, A. M. (1995). *PROPERTIES OF CONCRETE. 4TH AND FINAL EDITION*.
<https://trid.trb.org/View/454875>
- Pngwing. (2020). *Rosa en blanco y negro, norte, rosa de los vientos, dibujo, rosa de los vientos, puntos de la brújula, dirección cardinal, este, ángulo, zona, En blanco y negro png* | PNGWing.
https://www.pngwing.com/es/free-png-vdhuf#google_vignette
- Potgieter, I. C., & Gamble, W. L. (1989). Nonlinear Temperature Distributions in Bridges at Different Locations in the United States. *PCI Journal*, 34(4), 80–103.
<https://doi.org/10.15554/PCIJ.07011989.80.103>
- Prado, C. (2008). Cámaras térmicas. *Negocios de seguridad*, 36, 132141.
http://rnds.com.ar/articulos/036/RNDS_128W.pdf
- Priestley, M. J. (1972). Thermal gradients in bridges - Some design considerations. *NEW ZEALAND ENGINEERING*, 27(7).
- R Core Team. (2020). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.r-project.org/>
- Romero, M. (2016). Pruebas de bondad de ajuste a una distribución normal. *Revista Enfermería del Trabajo*, 6(3), 105–114.

- Roy-García, I., Rivas-Ruiz, R., Pérez-Rodríguez, M., & Palacios-Cruz, L. (2019). Correlation: Not all correlation entails causality. *Revista Alergia Mexico*, 66(3), 354–360.
<https://doi.org/10.29262/ram.v66i3.651>
- Rul, D. (2019). Termopares industriais: 1ª parte. *Revista robótica*, 14–16.
<https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/29161/1/Artigo%20Rob%C3%B3tica%2015%20Trie%202019.pdf>
- Serna, A., Ros, F., & Rico, J. (2010). *GUÍA PRÁCTICA DE SENSORES* -. Creaciones copyright SL.
https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=CuoXCd6ZZqWC&oi=fnd&pg=PR9&dq=sensopres+infrarrojos+de+temperatura&ots=BwhO631wm6&sig=E_v9r_2o5wRtgP138jb42X7MKXs#v=onepage&q=sensopres%20infrarrojos%20de%20temperatura&f=false
- Sheng, X., Zhou, T., Huang, S., Cai, C., & Shi, T. (2022). Prediction of vertical temperature gradient on concrete box-girder considering different locations in China. *Case Studies in Construction Materials*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01026>
- Song, Z., Xiao, J., & Shen, L. (2012). On temperature gradients in high-performance concrete box girder under solar radiation. *Advances in Structural Engineering*, 15(3), 399–415.
<https://doi.org/10.1260/1369-4332.15.3.399>
- Sterling Sensors. (2019). *Fabricated Thermocouple with Crimp Seal*.
<https://www.sterlingsensors.co.uk/thermocouples/fabricated/fabricated-thermocouple-with-crimp-seal.html>
- SunEarthTools.com. (2024). *Posición del Sol*.
https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es

- Tayşi, N., & Abid, S. (2015). Temperature distributions and variations in concrete box-girder bridges: Experimental and finite element parametric studies. *Advances in Structural Engineering*, 18(4), 469–486. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.18.4.469>
- TE Connectivity. (2024). *Tipos de termopares*. <https://www.te.com/es/products/sensors/temperature-sensors/resources/thermocouple-types.html#chapter-2-dl>
- Teledyne Flir. (2019). *User's manual FLIR Ex series*. <https://mediprec.es/venta/termografia/camaras-termograficas/c%C3%A1mara-termogr%C3%A1fica-flir-e6-xt-882.html>
- Teledyne Flir. (2020). *COMPACT THERMAL CAMERA FLIR C5*. www.flir.com/C5
- USAID. (2015). *GLOBAL CLIMATE CHANGE, ADAPTATION, AND INFRASTRUCTURE ISSUES KNOWLEDGE MANAGEMENT SUPPORT*. https://www.climatelinks.org/sites/default/files/asset/document/BRIDGES_PRIMER_CCA_ENGINEERING_DESIGN.pdf
- Villamil, L. (2023). *Apoyo en la instrumentación de una viga e implementación de una Red Neuronal con aprendizaje supervisado para estimar temperatura en el concreto dentro del proyecto de investigación VIE-UIS No2823* [Universidad Industrial de Santander]. <https://noesis.uis.edu.co/items/d2ccd305-43b3-4d43-a4a3-6efad711aef5>
- Wang, Y., Zhan, Y., & Zhao, R. (2016). Analysis of thermal behavior on concrete box-girder arch bridges under convection and solar radiation. *Advances in Structural Engineering*, 19(7), 1043–1059. <https://doi.org/10.1177/1369433216630829>
- Weather Atlas. (2021). *Bucaramanga, Colombia - Clima y Previsión meteorológica mensual*. <https://www.weather-atlas.com/es/colombia/bucaramanga-clima#temperature>

Wheather Spark. (2021). *El clima en Bucaramanga, el tiempo por mes, temperatura promedio (Colombia) - Weather Spark*. <https://es.weatherspark.com/y/24381/Clima-promedio-en-Bucaramanga-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>

Apéndices

Apéndice A. Definición del polisombra.

Apéndice B. Análisis de sombras.

Apéndice C. Ensayo de compresión de concreto.

Apéndice D. Datos meteorológicos crudos.

Apéndice E. Gráficos de temperatura ambiente.

Apéndice F. Gráficos de la precipitación.

Apéndice G. Gráficos de la velocidad del viento.

Apéndice H. Gráficos de la radiación solar.

Apéndice I. Gráficos de perfiles de temperatura - VANT

Apéndice J. Gráficos de perfiles de temperatura – cámara portátil.

Apéndice K. Gráficos de perfiles de temperatura – termopares.

Apéndice L. Diferencias Cámaras.

Apéndice M. Temperatura internas mínimas.

“Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca
UIS”