

Gradientes Térmicos en Puentes de Concreto: Hacia un Sistema Predictivo Basado en Inteligencia Artificial

José M. Benjumea

Profesor Asociado

Escuela de Ingeniería Civil
Universidad Industrial de Santander (UIS)



Asociación de Ingenieros
Estructurales de Antioquia



Contenido

 ¿Cómo surge el gradiente térmico vertical (GTV)?

 ¿Qué efectos genera el GTV en los puentes?

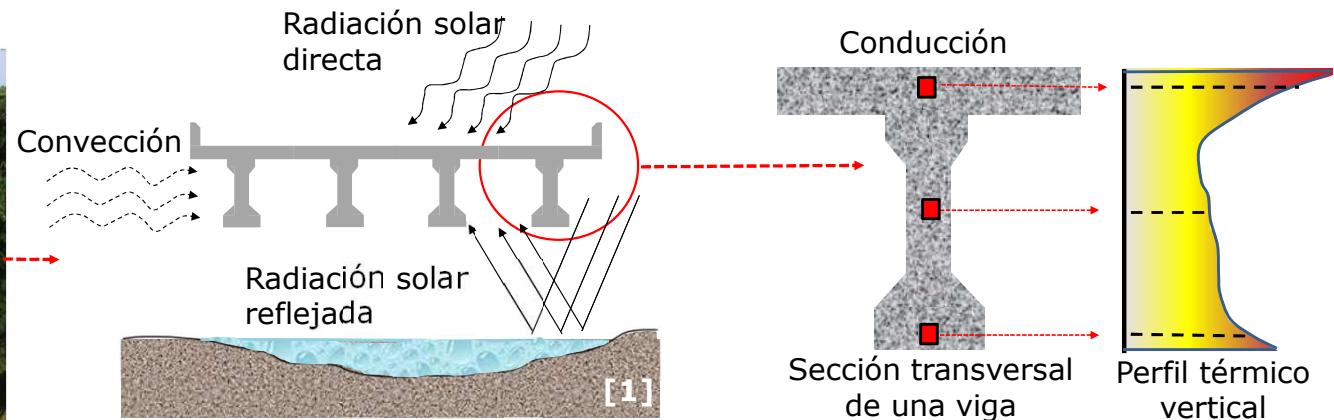
 ¿Qué tenemos a nivel normativo?

 Sistema predictivo de temperaturas internas

 Mensajes finales



¿Cómo surge el gradiente térmico vertical (GTV)?

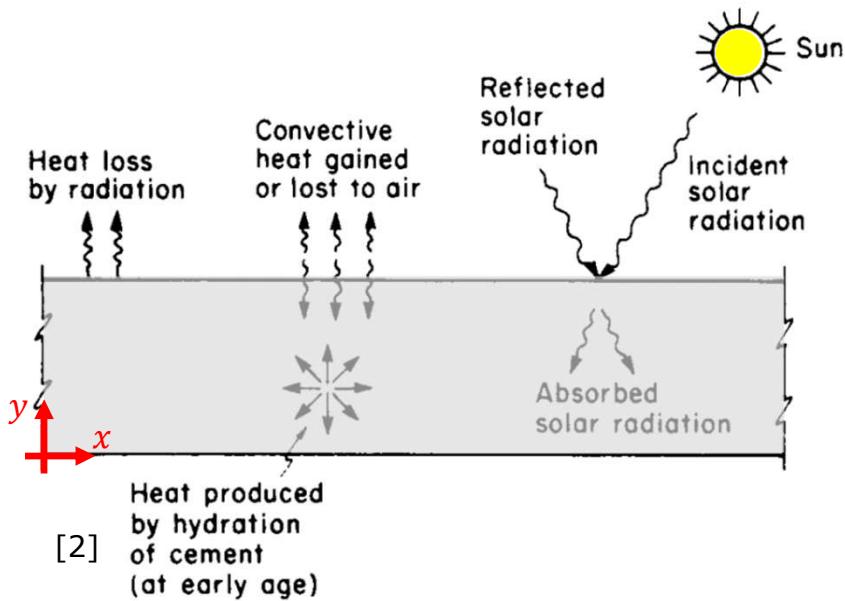


Variables:

- Geometría de la sección transversal.
- Propiedades térmicas del material.
- Color y rugosidad de la superficie.
- Hora del día (y estación*)
- Orientación y ubicación del puente.
- Ángulo de incidencia de rayos solares.
- Nubosidad.

[1] Cavadía, P., Benjumea, J. M., Begambre, O., Osorio, E., & Mantilla-Villalobos, M. An Open Database of Internal and Surface Temperatures of a Reinforced Concrete Slab-on-I-Beam Section. [10.3390/data10020021](https://doi.org/10.3390/data10020021)





$T(x, y)$, temperatura de un punto en el instante t .

k , conductividad térmica, $W/(m^{\circ}C)$

Q , calor generado dentro del cuerpo, W/m^3

p , densidad del material, kg/m^3

c , capacidad de calor específico, $J/(kg^{\circ}C)$

n_x, n_y , cosenos directores de vectores normales

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + Q = pc \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$k \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k \frac{\partial T}{\partial y} n_y + q = 0$$

$$q = q_s - q_{cr} = \alpha_a I_s - [h(T - T_a)]$$

q , cantidad de trasnferencia de calor por unidad de area por unidad de tiempo en las frontera, W/m^2

q_s , radiación solar, W/m^2 (máx. 1350)

q_{cr} , calor transferido por convección y re-radiación

h , coeficiente de transferencia de calor del material, $f(V)$

T_a , temperatura ambiente

[2] Gali, A., Favre, R., Elbadry, M. (2002). Concrete Structures: stresses and deformations. 3rd Ed. Spon Press. New York, NY.





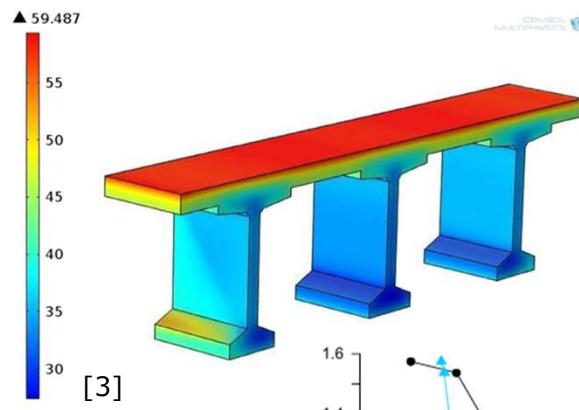
Table 10.1 Material properties

	Concrete	Steel	Asphalt
Thermal conductivity, k W/(m °C) or [Btu/(h ft °F)]	1.5–2.5 (0.87–1.5)	45 (26)	1.0 (0.60)
Specific heat, c J/(kg °C) or [Btu/(lb °F)]	840–1200 (0.20–0.29)	460 (0.11)	920 (0.22)
Density, ρ kg/m ³ or (lb/ft ³)	2400 (150)	7800 (490)	2100 (130)
Solar radiation absorptivity coefficient, α_s (dimensionless)	0.65–0.80	0.7 (rusted)	0.9
Radiation emissivity coefficient, α_e (dimensionless)	0.9	0.8	0.9
Coefficient of thermal expansion, α_t per °C (or per °F)	8.0×10^{-6} (4.4 × 10 ⁻⁶)	12×10^{-6} (6.7 × 10 ⁻⁶)	–

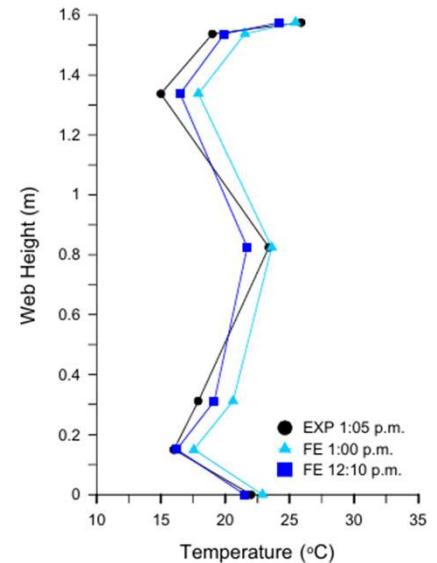
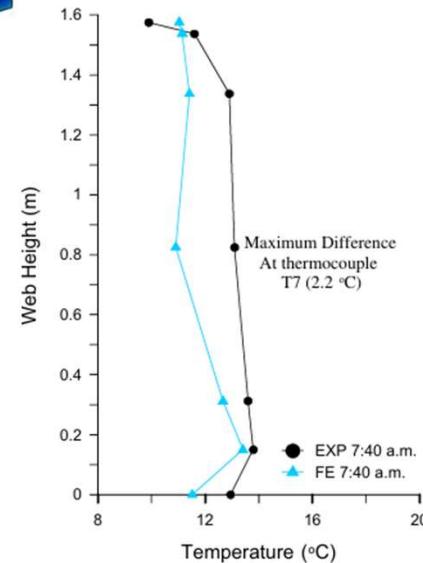
The following values may be employed for the convection heat transfer coefficient h_c (W/(m² °C)) (or Btu/(h ft² °F)), based on a wind speed of 1 m/s (3 ft/s) for all surfaces of a box-section bridge, except for the inner surfaces of the box, where the wind speed is considered zero.

	W/(m ² °C)	Btu/(h ft ² °F)
Top surface of concrete deck	8.5	1.5
Asphalt cover	8.8	1.6
Bottom surface of a cantilever	6.0	1.1
Inner surfaces of box	3.5	0.6
Outside box surface	7.5	1.3

[2] Gali, A., Favre, R., Elbadry, M. (2002). Concrete Structures: stresses and deformations. 3rd Ed. Spon Press. New York, NY.



[3]



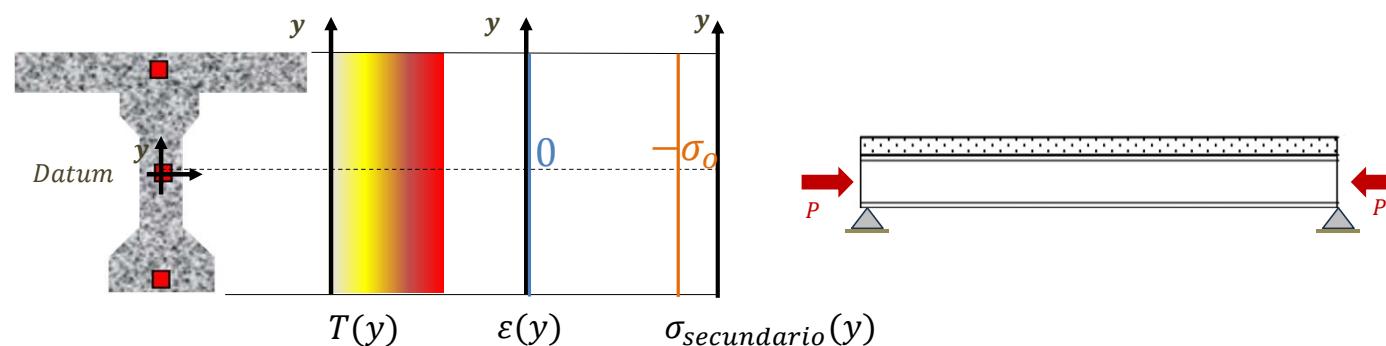
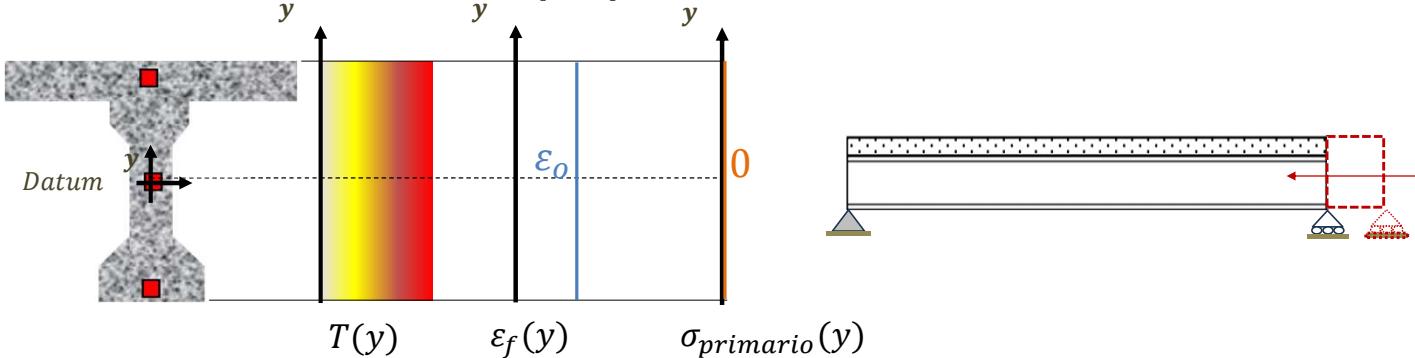
[3] Sallal, R. (2018). Three-dimensional finite element temperature gradient analysis in concrete bridge girders subjected to environmental thermal loads. [/10.1080/23311916.2018.1447223](https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1447223)



¿Qué efectos genera el GTV en los puentes?

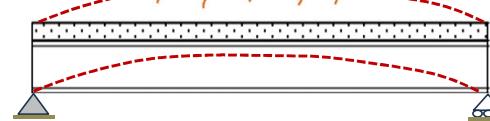
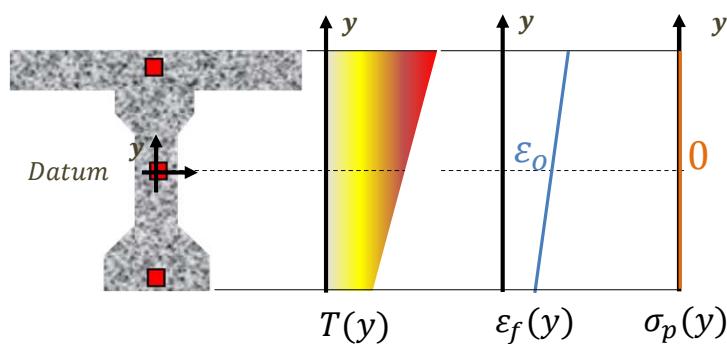


Caso 1: Perfil uniforme (TU)

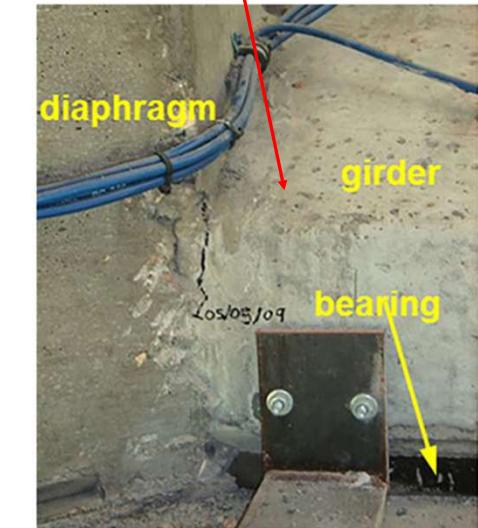
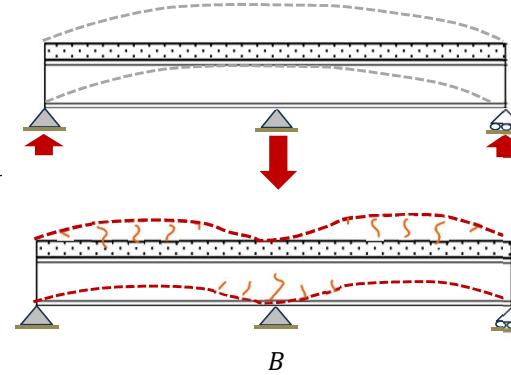
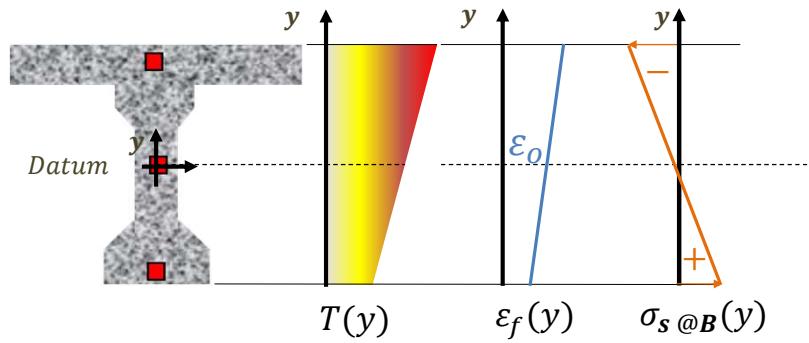




Caso 2: Perfil lineal (TG)



John James Audubon Bridge (Louisiana, US)

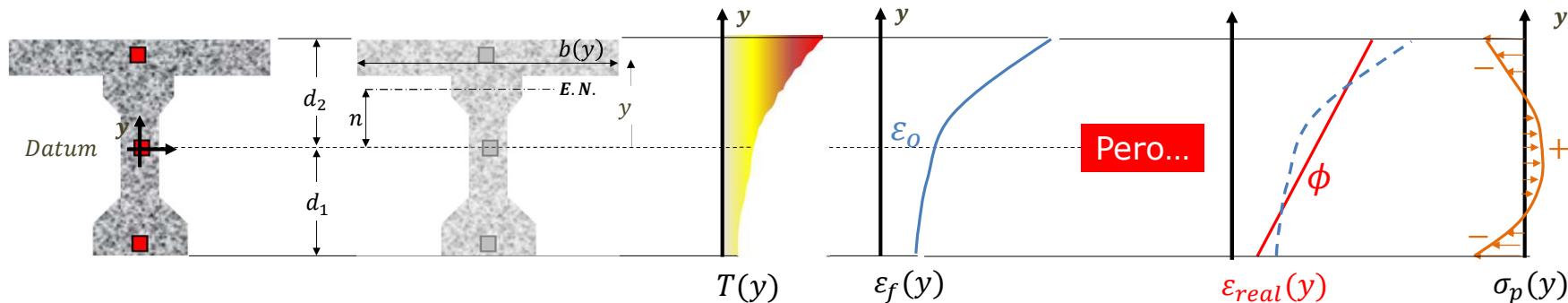


[4] Hossain, et al. (2020). Structural effects of temperature gradient on a continuous prestressed concrete girder bridge: [10.1080/15732479.2020.1713167](https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1713167)





Caso 3: Perfil no lineal (TG)



$$\varepsilon_f(y) = \alpha T(y)$$

$$\sigma_p(y) = E[\varepsilon_{real}(y) - \alpha T(y)]$$



5.4.2.2 — Coeficiente de expansión térmica — El coeficiente de expansión térmica debe determinarse por medio de ensayos de laboratorio sobre la mezcla específica que se usará.

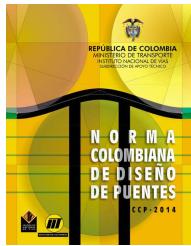
A falta de datos más precisos, el coeficiente térmico de expansión puede tomarse como:

- Para concreto con peso normal: $1.08 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ y
- Para concreto liviano: $1.7 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$

Son “auto equilibrantes”

$\varepsilon_o \ \phi \ \sigma_p(y)$





4.6.6 — Análisis por gradiente de temperatura — Donde se requiera la determinación de los efectos de las fuerzas debidas a gradiente de temperatura vertical, el análisis debe considerar la elongación axial, la deformación por flexión, y los esfuerzos internos.

Los gradientes deben ser considerados como se especifica en el Artículo 3.12.3.

ε_o

La deformación unitaria axial uniforme correspondiente es:

$$\varepsilon_u = \alpha(T_{UG} + T_u) \quad (C4.6.6-2)$$

ϕ

La rotación por unidad de longitud correspondiente a esta curvatura se puede determinar así:

$$\phi = \frac{\alpha}{I_c} \iint T_G z dw dz = \frac{1}{R} \quad (C4.6.6-3)$$

ESFUERZO INTERNO

$$\sigma_p(y) \quad \sigma_E = E[\alpha T_G - \alpha T_{UG} - \phi z] \quad (C4.6.6-6)$$

Por ejemplo, la parte de la deformación por flexión del gradiente flecta la superestructura prismática en un segmento de círculo en el plano vertical. Para una estructura de dos luces con longitud, L (mm), la viga no restringida se levantaría del apoyo central en una distancia $\Delta = L^2/2R$. Forzar la viga para eliminar Δ desarrollaría un momento cuyo valor en la pila sería:

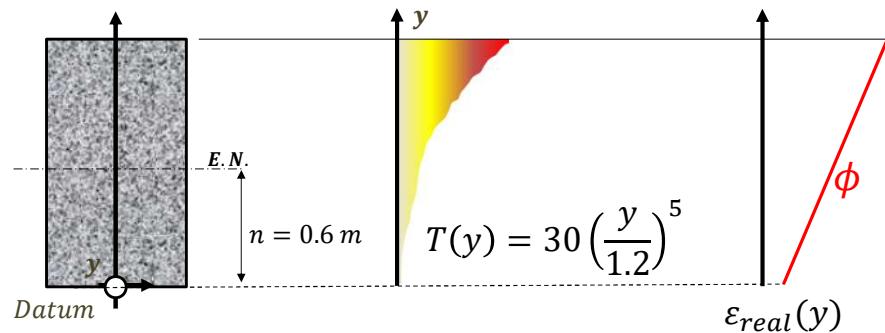
$$M_c = \frac{3}{2} EI_c \phi \quad (C4.6.6-7)$$





Ejemplo

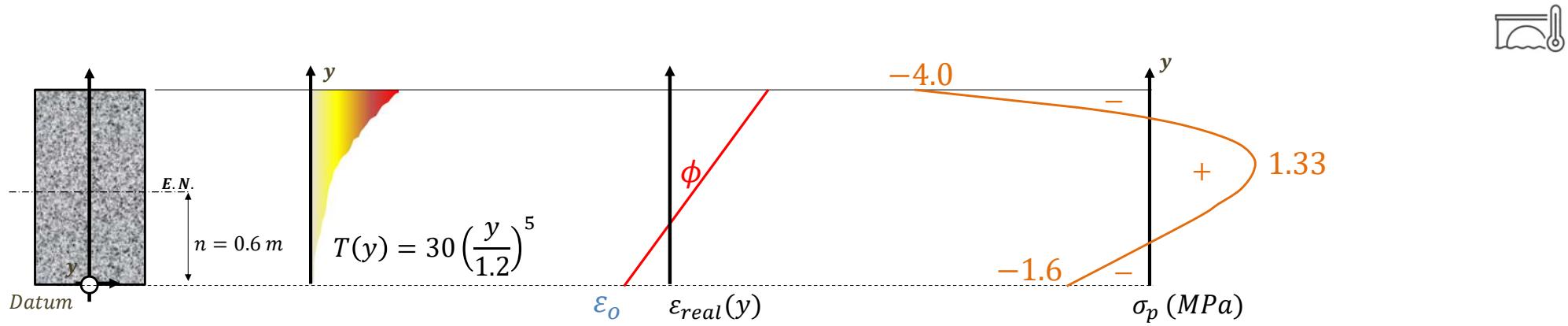
- Viga rectangular de concreto reforzado. Sección no fisurada $b = 0.35 \text{ m}$ $h = 1.2 \text{ m}$
- $E = 28000 \text{ MPa}$, $\alpha = 10 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, $f_r = 3 \text{ MPa}$
- Perfil de temperatura: polinomio de orden 5 con máximo $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$



$$\phi = \frac{\alpha}{I} \int_{-d_1}^{d_2} T(y) b(y) (y - n) dy = \frac{1 \times 10^{-5}}{1/12(0.35)(1.2)^3} \int_0^{1.2} 30 \left(\frac{y}{1.2}\right)^5 0.35 (y - 0.6) dy$$

$$\phi = 1.7857 \times 10^{-4} \text{ rad/m} \quad (R = 5600 \text{ m})$$



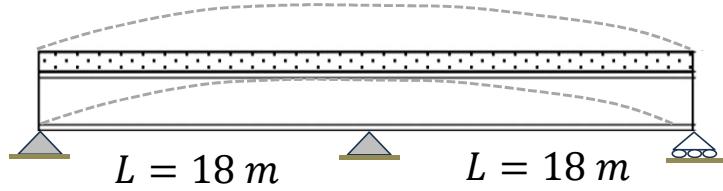


$$\varepsilon_o = \left[\frac{\alpha}{A} \int_{-d_1}^{d_2} T(y) b(y) dy \right] - n\phi = \left[\frac{1 \times 10^{-5}}{0.35 * 1.2} \int_0^{1.2} 30 \left(\frac{y}{1.2} \right)^5 0.35 dy \right] - 0.6(1.7857 \times 10^{-4})$$

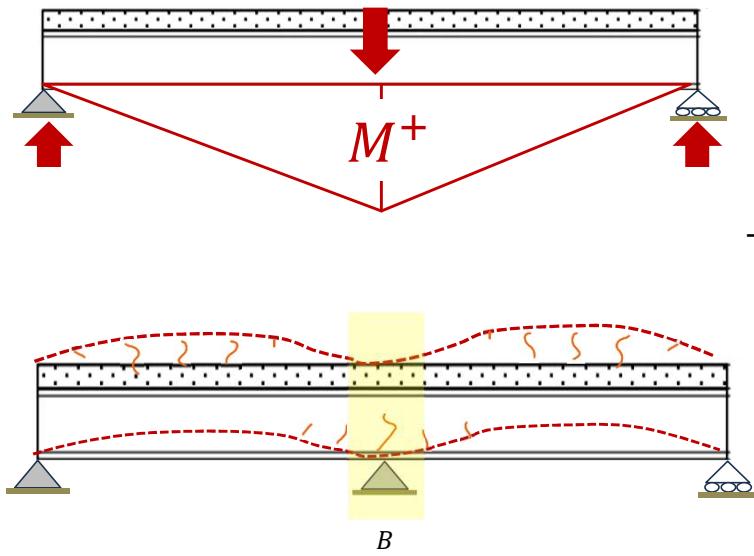
$$\varepsilon_o = -5.714 \times 10^{-5} \text{ mm/mm}$$

$$\sigma_p(y) = E[\varepsilon_o + \phi y - \alpha T(y)] = -1.6 + 5y - 30 \times 10^{-5} \left(\frac{y}{1.2} \right)^5 \text{ MPa}$$

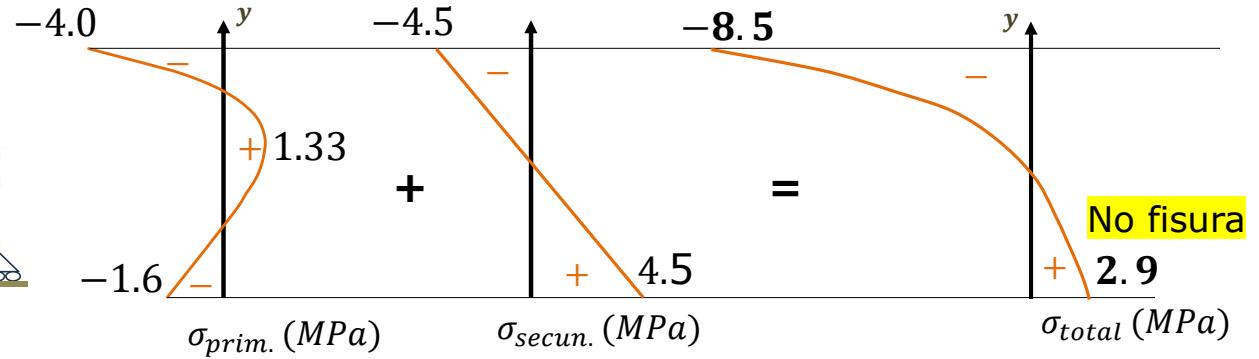




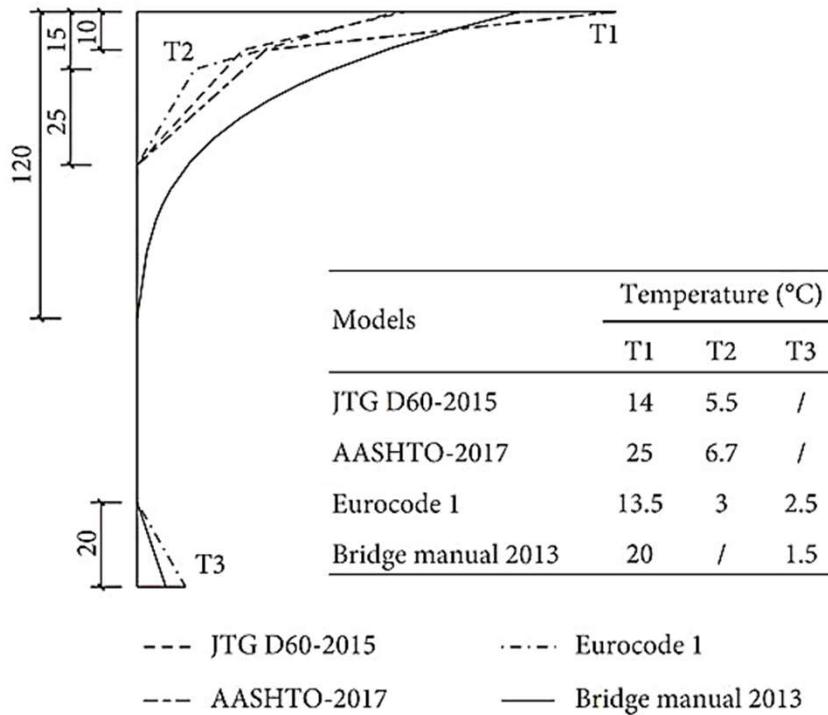
$$\Delta = \frac{L^2}{2R} = \frac{18^2}{2(5600)} = 0.029 \text{ m}$$



$$M^+ = \frac{3}{2} EI\phi = \frac{3}{2} E(0.0504)\phi = 378 \text{ kN} \cdot \text{m}$$



¿Qué tenemos a nivel normativo?



[5] Gu et al. (2020). Temperature Gradient and Its Effect on Long-Span Prestressed Concrete Box Girder Bridge [10.1155/2020/5956264](https://doi.org/10.1155/2020/5956264)

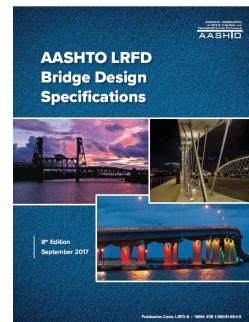


Table 3.12.3-1—Basis for Temperature Gradients

Zone	T_1 (°F)	T_2 (°F)
1	54	14
2	46	12
3	41	11
4	38	9



Figure 3.12.3-1—Solar Radiation Zones for the United States

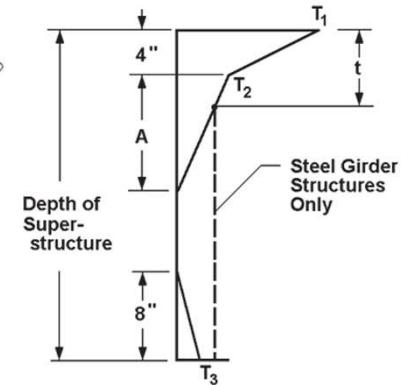


Figure 3.12.3-2—Positive Vertical Temperature Gradient in Concrete and Steel Superstructures



- Acciones térmicas adaptadas de USA

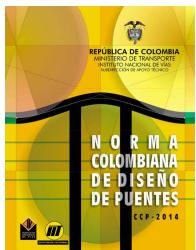
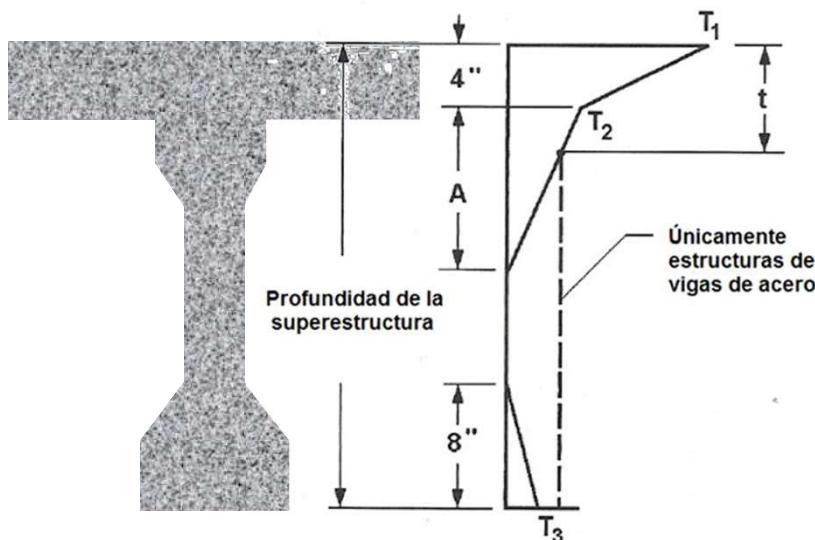


Tabla 3.12.3-1-Bases para Gradientes de Temperatura

Zona	T ₁ , °C	T ₂ , °C
1	30	7.8
2	25	6.7
3	23	6
4	21	5



lleva a ninguna aflicción estructural, el Propietario puede escoger excluir el gradiente de temperatura. Los puentes de vigas múltiples son un ejemplo del tipo de estructura para el cual debería considerarse el criterio y la experiencia.

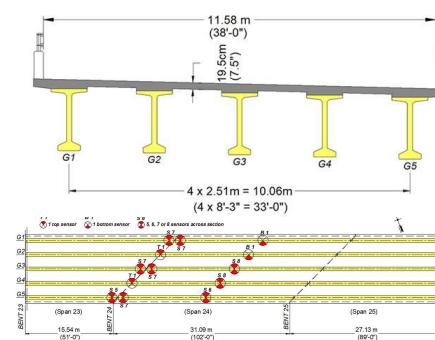
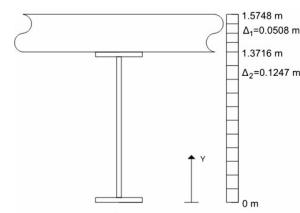
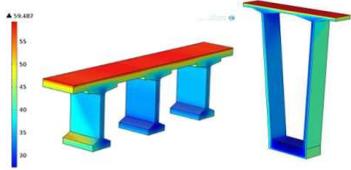
El gradiente vertical de temperatura en superestructuras de acero y concreto con tableros de concreto puede tomarse de la Figura 3.12.3-1.

El gradiente de temperatura dado aquí es una modificación de la propuesta en Imbsen et al. (1985), que estaba basada en estudios de superestructuras de concreto. La adición de superestructuras de acero sigue el modelo del gradiente de temperatura para ese tipo de puentes en las especificaciones para puentes de Australia (AUSTROADS, 1992).

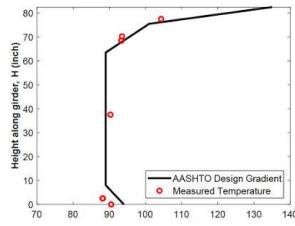
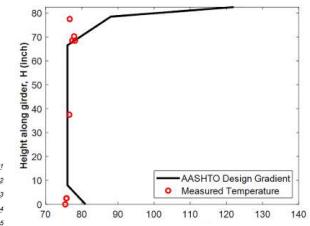




Datos + Simulación numérica 1D, 2D o 3D



Validaciones en campo (instrumentación interna)





Sistema Predictivo de Temperaturas Internas

- Monitoreo de la salud estructural (**SHM**) es necesario.
- Sensores para la detección, localización y diagnóstico.
- Posición geográfica, accesibilidad, condiciones climáticas, costos, tiempos ...



Sistema nervioso
(interno)

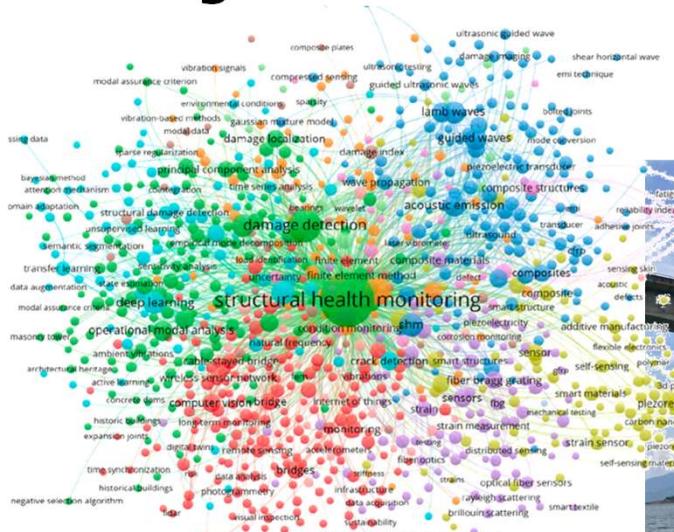


Sensores con o sin
contacto (externo)



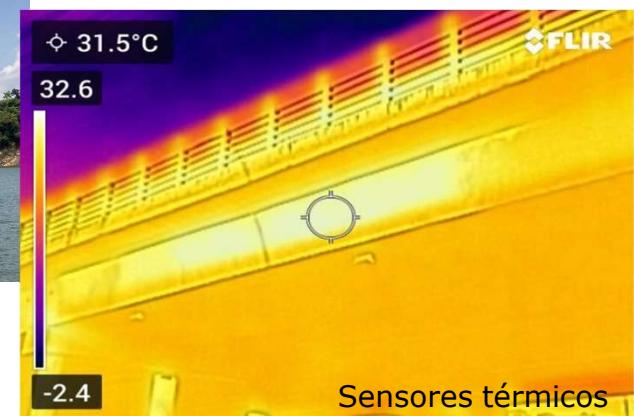


- Avances sustanciales en SHM si se integran **drones + sensores avanzados + inteligencia artificial + gemelos digitales** [6-8].



Replicado de [5]

Inspeccionabilidad limitada



Sensores térmicos

[6] Liang et al., (2023) Towards UAVs in construction: advancements, challenges, and future directions for monitoring and inspection. *Drones* 7(3): 202.

[7] Wang J & Ueda T (2023) A review study on unmanned aerial vehicle and mobile robot technologies on damage inspection of reinforced concrete structures. *Structural Concrete* 24(1): 536–562.

[8] Fayyad et al., (2024) A scientometric analysis of drone-based structural health monitoring and new technologies. *Advances in Structural Engineering*. 0(0): 1-23.



De Medellín para el mundo: Conectando saberes, construyendo futuro





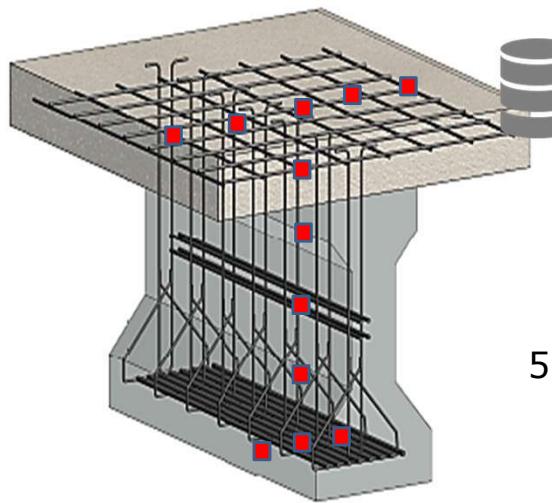
Equipo de Trabajo

- **Estudiantes:** Pedro Juan Cavadía (Magíster en Ing. Civil, 2025)
César Andrés Méndez (Candidato a Magíster en Ing. Civil, ¿2026?)
9 estudiantes de pregrado
- **Profesores:** José M. Benjumea (Escuela de Ingeniería Civil, UIS)
Oscar Begambre (Escuela de Ingeniería Civil, UIS)
Edison Osorio (Escuela de Ingeniería Civil, UAN-Bogotá)
Hoover Rueda (Escuela de Ingeniería Sistemas, UIS)
María A. Mantilla (Escuela de Ingeniería Electrónica, UIS)
- **Financiación:** Vicerrectoría de Investigación y Extensión UIS (2803)

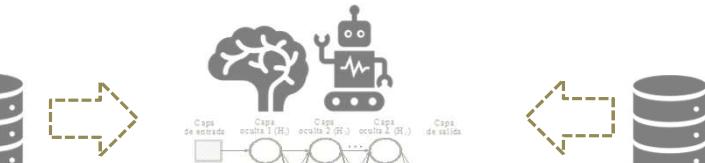
Output



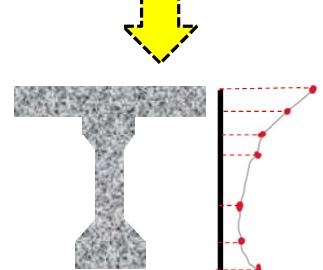
De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



Instrumentación interna
(contacto)
Datos c/30 min



10/07/23 - 06/11/23
52 días con medición interna y externa



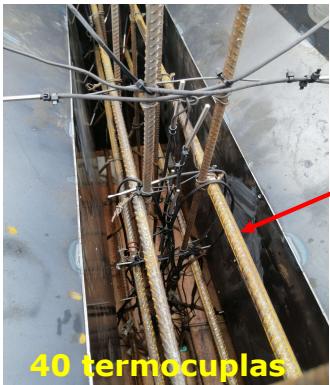
Output

Input

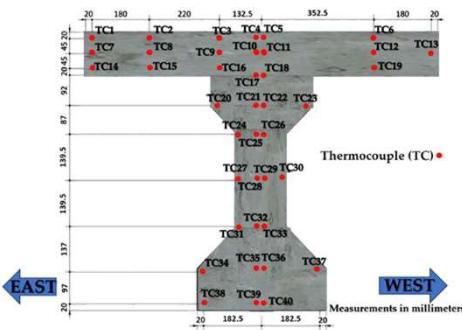


Instrumentación externa
(sin contacto)
6:30 am - 4 pm
c/30 min





Davis Vantage Pro2-WLRS Weather Station



Cámara FLIR E6 XT

Resolución de imagen térmica 240 x 180 px (43,200 px)
Rango: -20 a +550 °C
Exactitud = $\pm 2^{\circ}\text{C}$

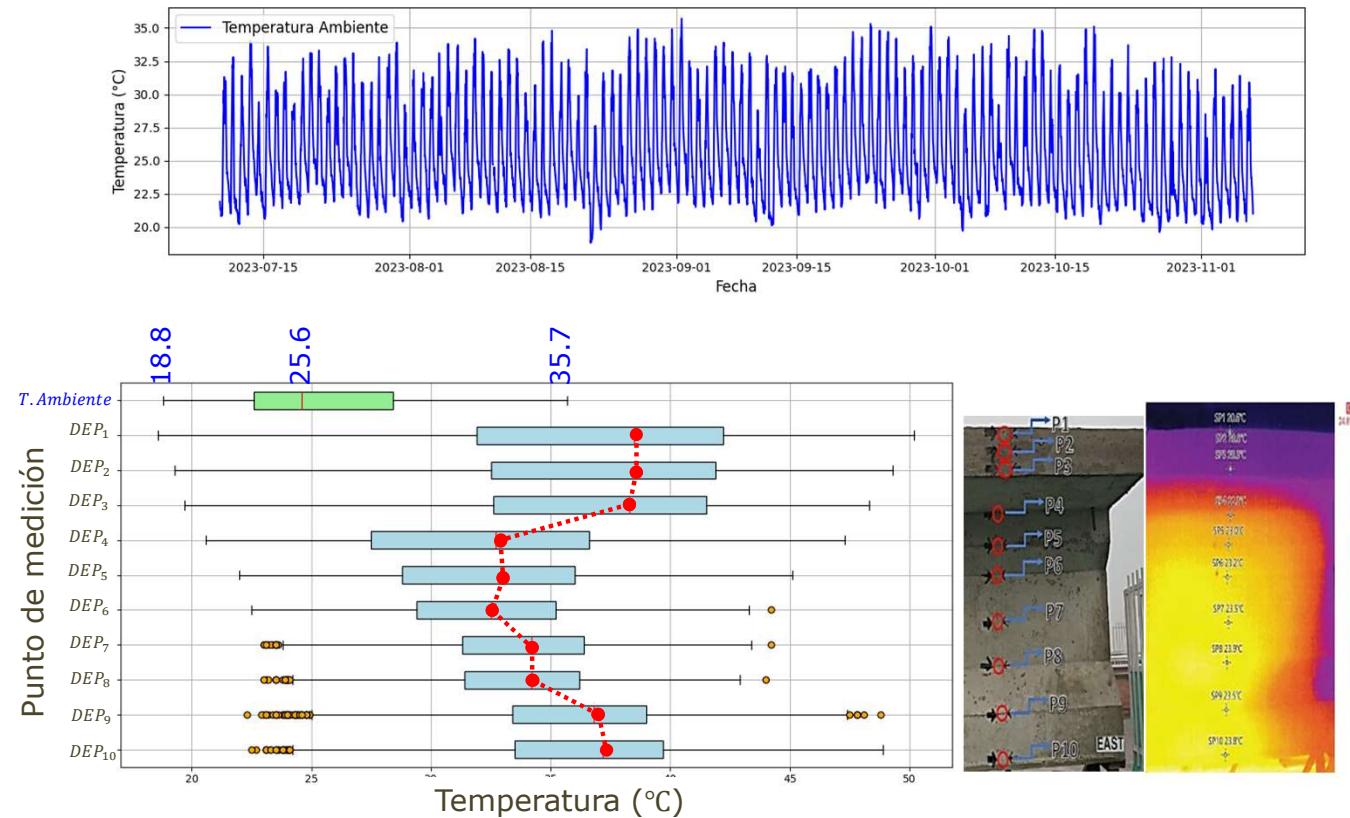
Dron DJI Mavic 2 Enterprise Advanced

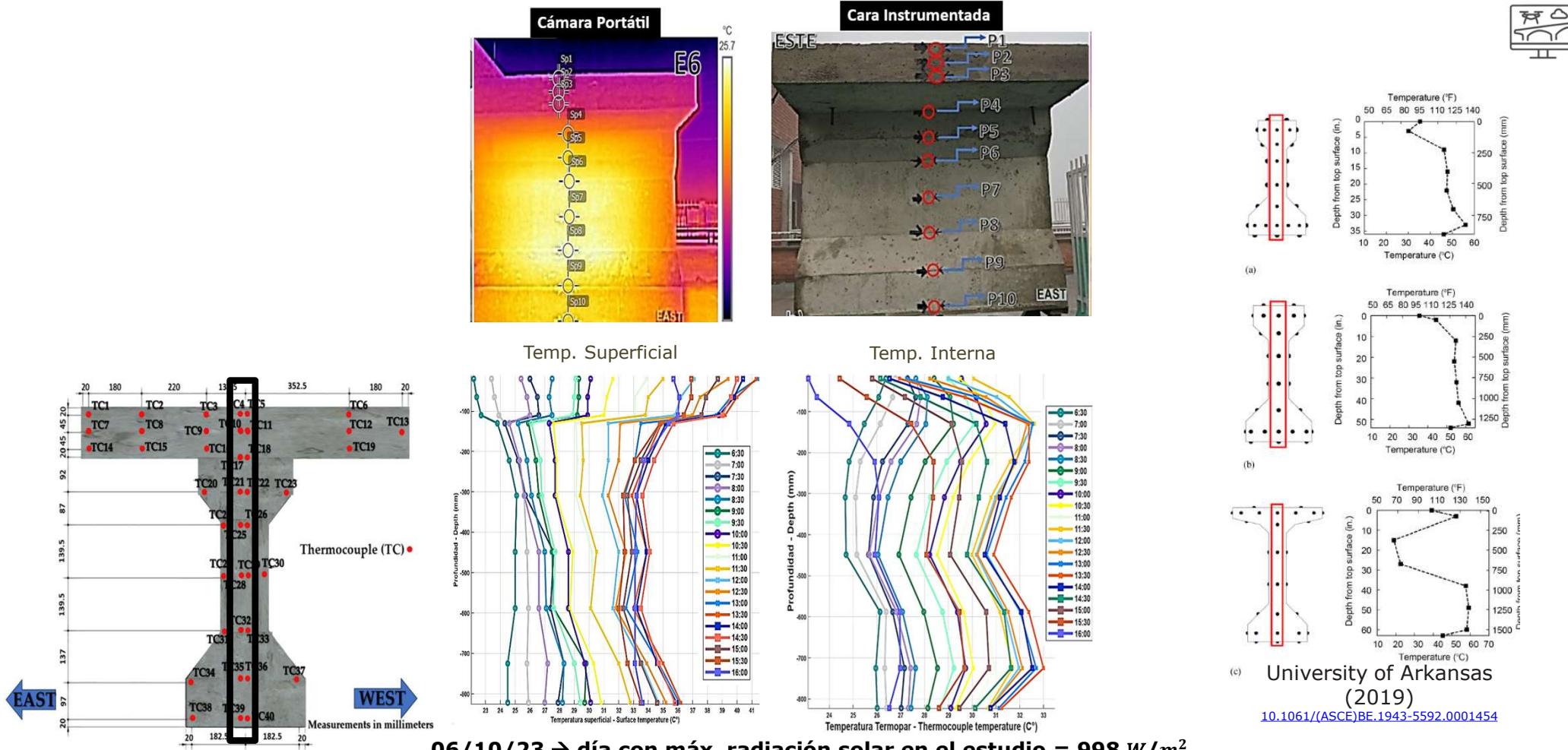
Resolución de imagen térmica 640 x 512 px (327,680 px)
Zoom digital: 16x
Exactitud = $\pm 2^{\circ}\text{C}$





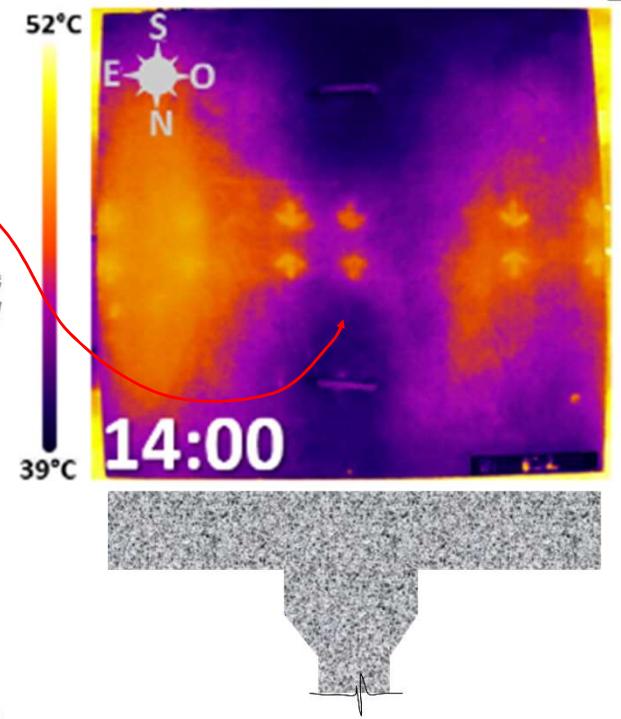
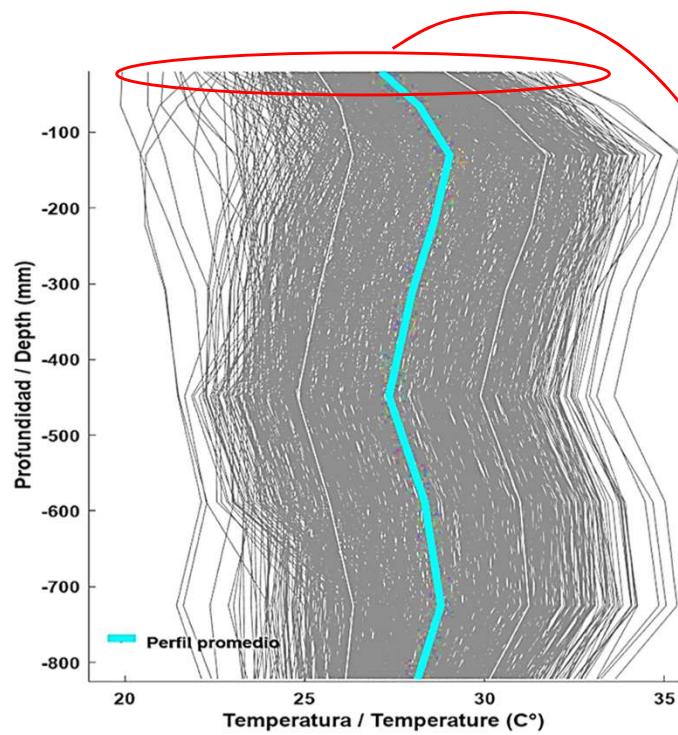
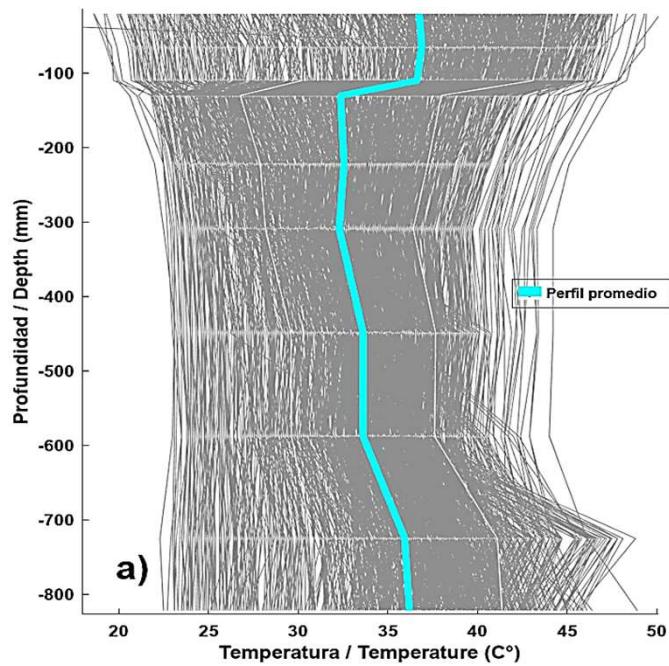
• Temperaturas ambiente y superficial





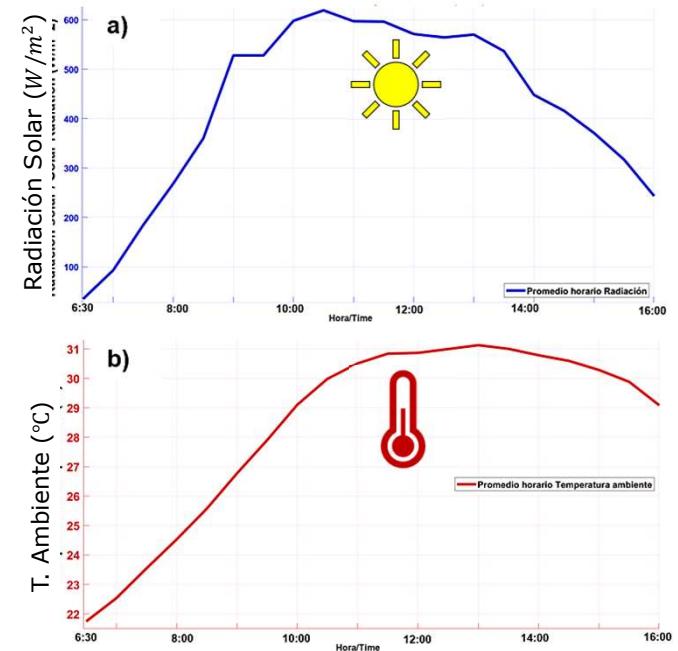
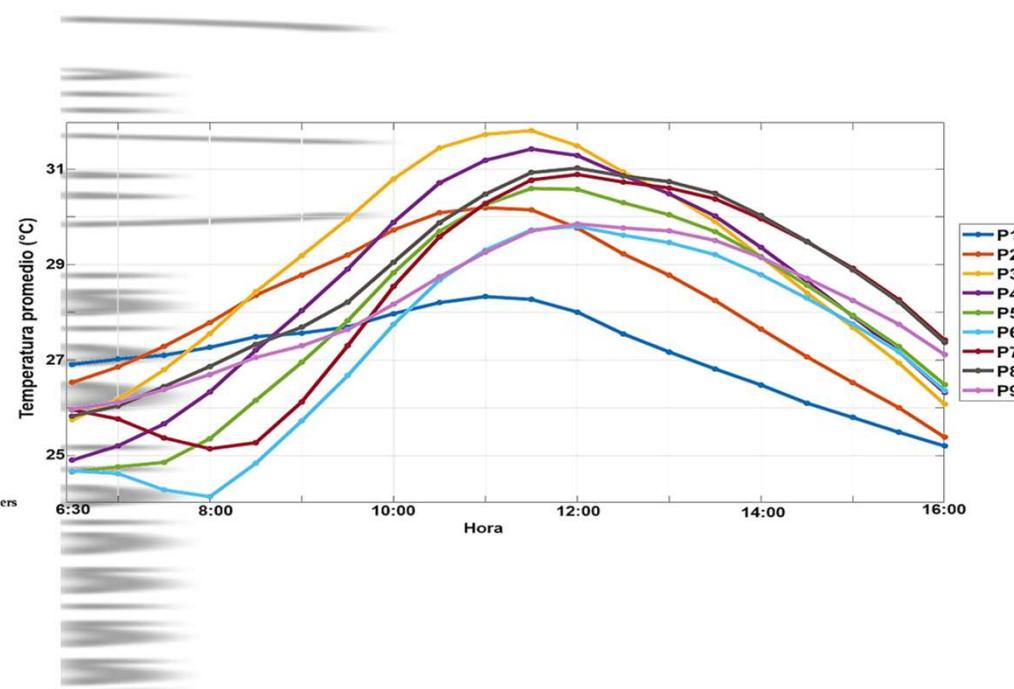
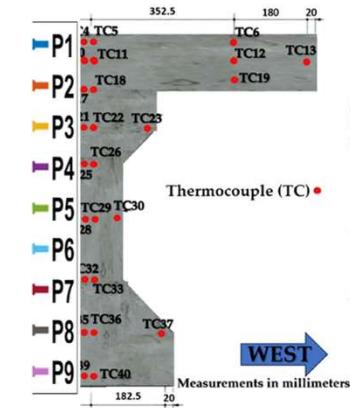
06/10/23 → día con máx. radiación solar en el estudio = 998 W/m^2

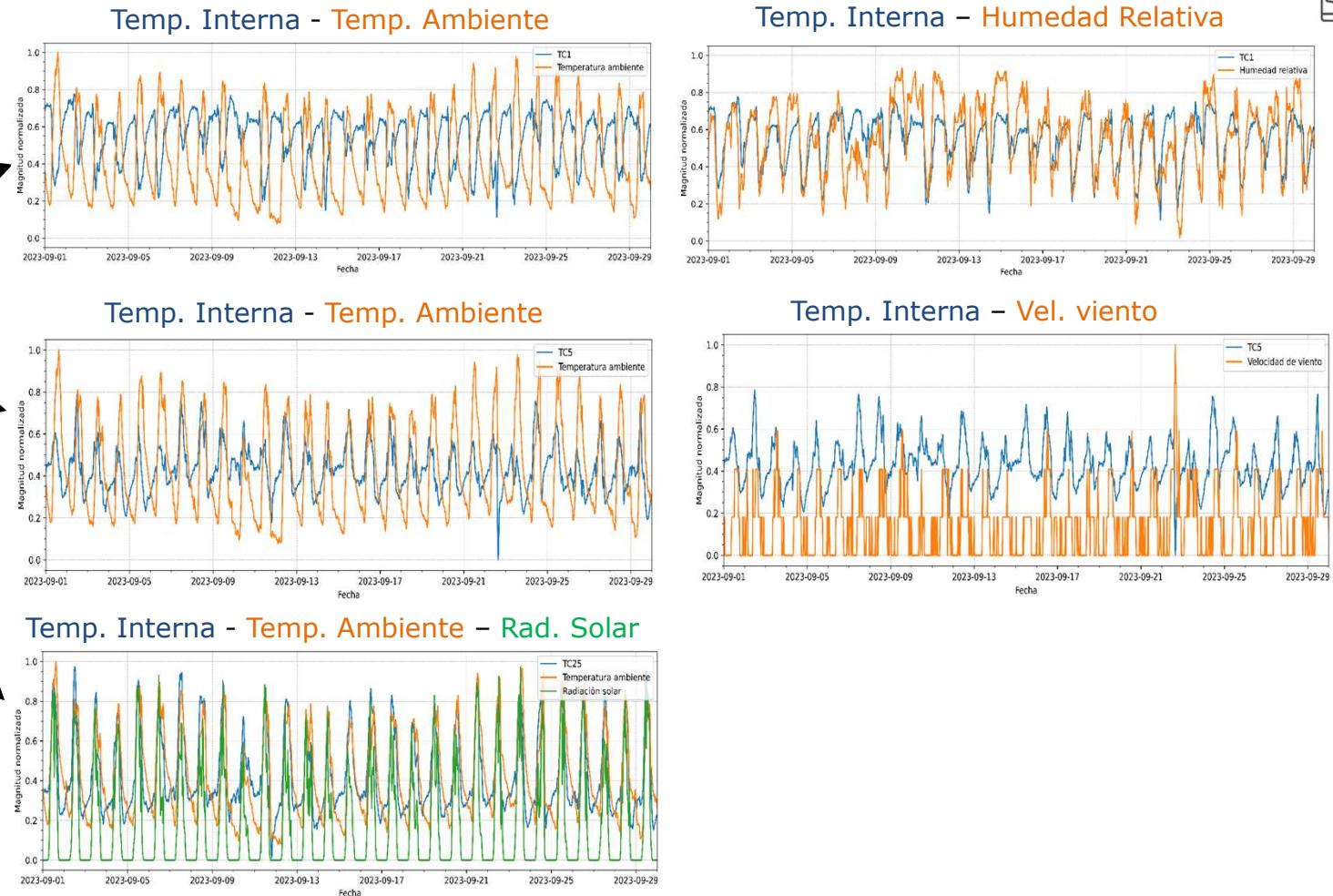
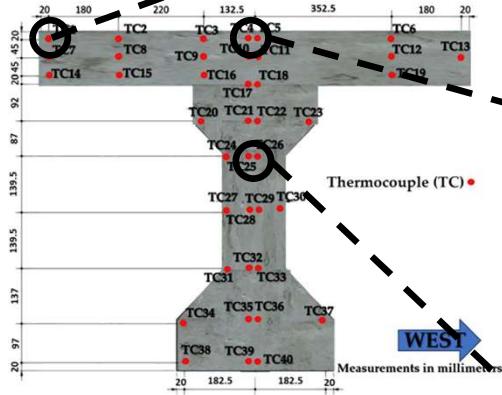
De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro





- Temperatura interna asociada con los parámetros meteorológicos





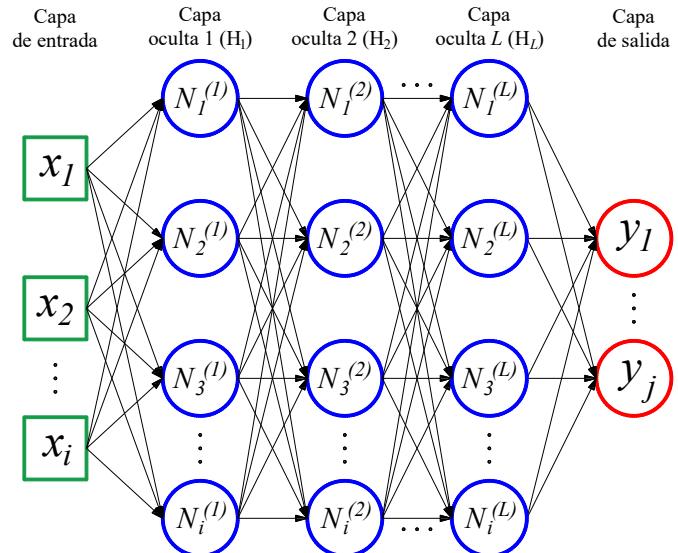
**De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro**





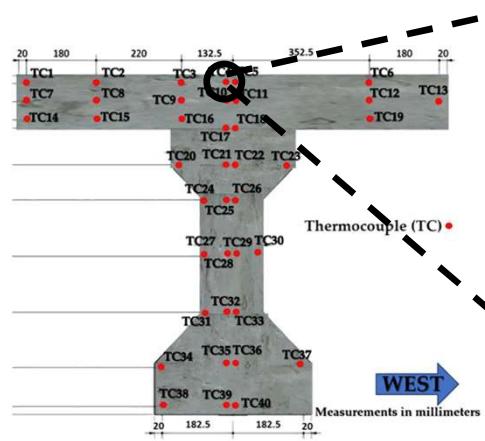
Red Neuronal Long Short Term Memory (LSTM)

- Dependencias de largo plazo.
- Otras aplicaciones de respuestas estructurales continuas como $u(t)$, $\dot{u}(t)$, $v(t)$...
- Incluyen “puertas” de olvido para evitar el *overfitting*
- Entrena (70%)
Valida (15%)
Predicción (15%)



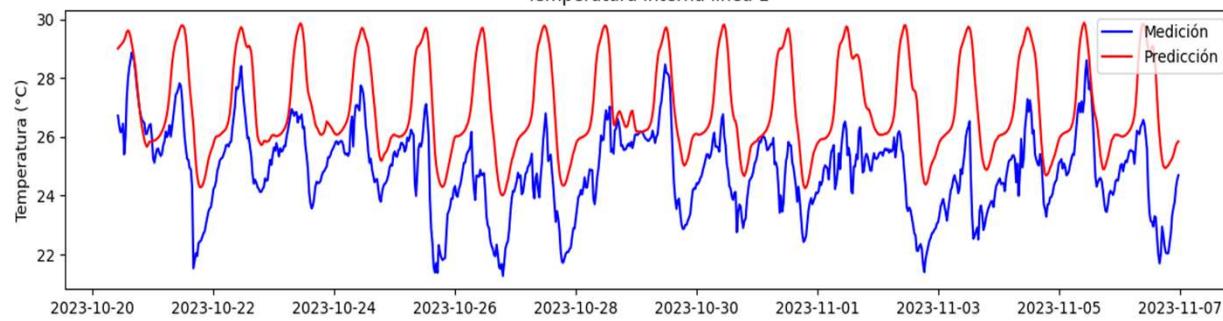
Hiperparámetros	Rango valores
Tasa de aprendizaje	0.0001, 0.001, 0.01, 0.1
Número de capas ocultas	1, 2, 3, 4, 5
Cantidad de paquetes	16, 32, 64, 128
Número de neuronas por capa	16, 32, 64, 128
Número de épocas	100, 150





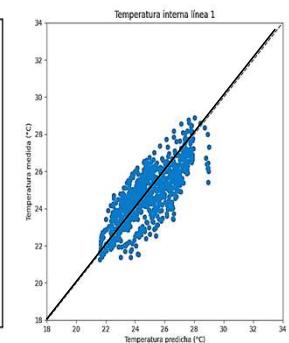
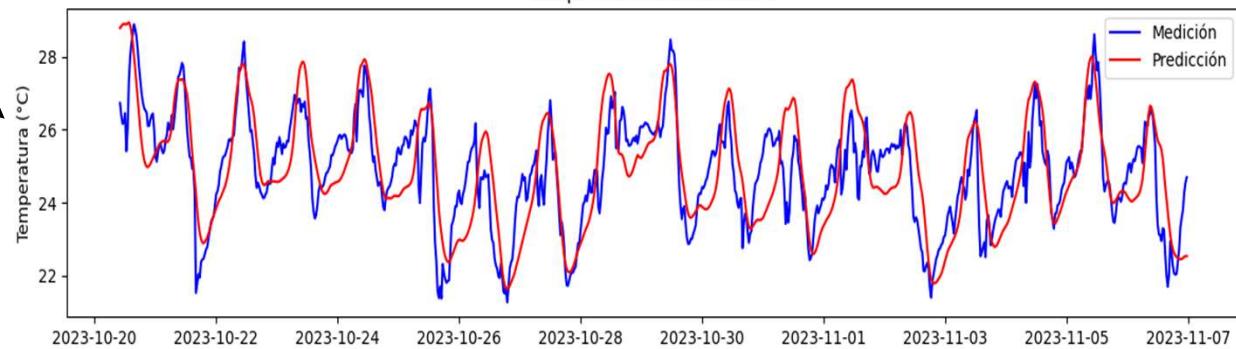
"Mala" predicción

Temperatura interna línea 1



"Buena" predicción

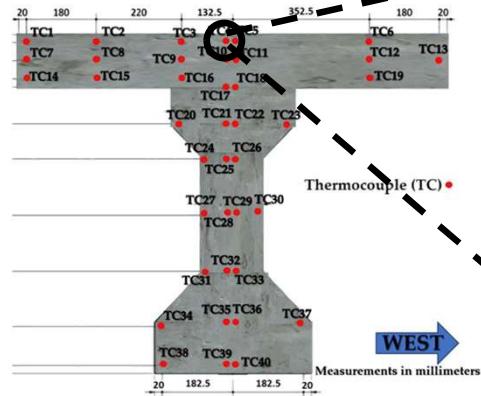
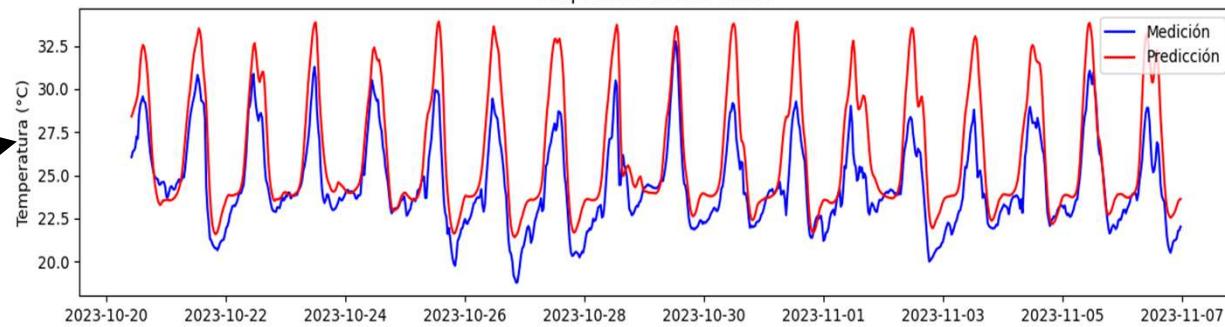
Temperatura interna línea 1





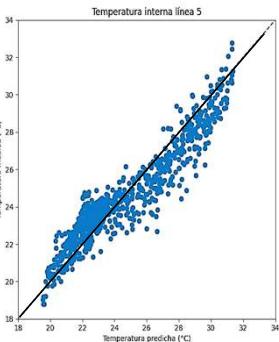
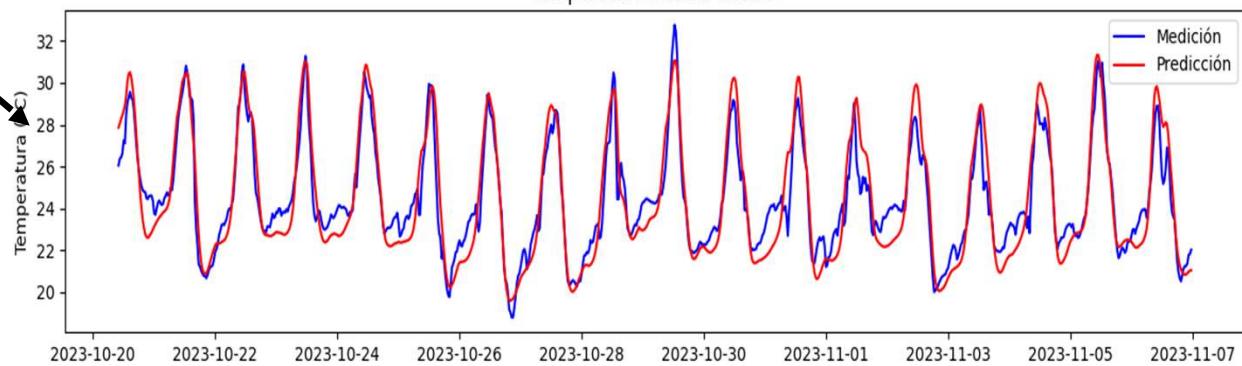
“Mala” predicción

Temperatura interna línea 5



“Buena” predicción

Temperatura interna línea 5



Mensajes Finales



- Considerar efectos térmicos en el análisis/diseño de estructuras complejas con rigidez seccional a flexión relativamente alta.



- Se requiere trabajo conjunto para adelantar estudios locales de acciones térmicas (**Gobierno + Universidades + Empresas**).



- El sistema de monitoreo térmico tiene potencial para ser usado en sistemas de alerta temprana de estructuras complejas.



¡Gracias!

José Miguel Benjumea
josbenro@uis.edu.co



30



Asociación de Ingenieros
Estructurales de Antioquia

