

SIMULADOR TÉRMICO DE PAVIMENTOS URBANOS CON INTERFAZ ACCESIBLE PARA EL USUARIO

Pablo Cabrera¹, Maximiliano Martínez¹, Gerardo Botasso¹, Ana M. Castro Luna²

¹Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata, LEMaC Centro de Investigaciones
Viales UTN FRLP – CIC PBA, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

²Comisión de Investigaciones Científicas CIC PBA, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

e-mail: pcabrera@frlp.utn.edu.ar

RESUMEN: La predicción de temperaturas superficiales en pavimentos es clave para evaluar cómo los pavimentos fríos contribuyen a mitigar islas de calor urbanas, optimizar durabilidad de materiales y mejorar eficiencia energética en entornos construidos. Sin embargo, su compleja interacción con variables climáticas (radiación solar, viento, humedad) requiere herramientas de simulación numérica accesibles, capaces de integrar datos reales y evaluar diseños estructurales bajo múltiples escenarios. Este trabajo aborda este desafío mediante el desarrollo de un programa interactivo que combina un modelo de balance energético (flujos conductivos, convectivos y radiativos) con una interfaz gráfica intuitiva (GUI). El software, desarrollado en Python, permite cargar series climáticas históricas en formato CSV y simular la evolución térmica del pavimento, considerando propiedades opto-térmicas como albedo, emisividad, espesor, densidad, conductividad térmica y calor específico. La interfaz, diseñada para usuarios no expertos, facilita comparar múltiples configuraciones estructurales y cuantificar la sensibilidad térmica ante cambios en variables clave. Validado con datos experimentales, el programa emerge como una herramienta versátil para la toma de decisiones en diseño urbano resiliente al cambio climático, disminuyendo el impacto al ambiente y priorizando soluciones que equilibren desempeño técnico y sostenibilidad ambiental.

Palabras clave: modelado térmico, isla de calor urbana, interfaz gráfica, pavimentos sostenibles, Python.

INTRODUCCIÓN

La energía que los pavimentos de asfalto u hormigón pueden absorber o emitir hacia el entorno, difiere considerablemente de la de las superficies naturales de suelo debido a las propiedades térmicas y de absorción distintivas de estos materiales (Qin & Hiller, 2014). Estas estructuras tienen una menor capacidad de reflejar la radiación solar que incide sobre ellas (albedo), lo que incrementa la cantidad de energía que absorben con respecto al suelo natural. De hecho, pavimentos nuevos elaborados con mezcla asfáltica reflejan solo el 5% de la radiación solar incidente, contribuyendo a que sus superficies alcancen valores cercanos a 70 °C en días de verano. Además, al ser predominantemente de estructura cerrada o densa, sellan el suelo natural subyacente y reducen notablemente la evapotranspiración, lo que hace que toda la energía solar absorbida se traduzca en calor sensible e incremente la temperatura del material (Santamouris, 2013). Considerando que los pavimentos comprenden entre el 20 y el 40% de un tejido urbano típico, estas superficies calientes descargan calor sensible a la atmósfera urbana, agravando así el efecto de isla de calor urbano (ICU) (Wang et al., 2022).

Investigaciones previas han demostrado que existen diversas estrategias para mitigar la contribución de los pavimentos a las islas de calor, las cuales se basan en: i) aplicar recubrimientos superficiales con elevados valores de albedo y emisividad; ii) incorporar materiales modificadores que incrementen dichas propiedades en las mezclas; iii) diseñar pavimentos retentivos de agua para transformar la energía



solar absorbida en calor latente; iv) utilizar sistemas mecánicos que extraen calor excedente mediante circulación de agua por tubos embebidos; y v) emplear ligantes sintéticos de alto albedo y emisividad (Gong et al., 2023; Martínez et al., 2024; Pascual Muñoz et al., 2013).

Los pavimentos fríos se definen como aquellos que, bajo mismas condiciones de irradiancia solar, alcanzan menores valores de temperatura superficial y emiten menos calor sensible que un pavimento convencional. La predicción de temperaturas superficiales en pavimentos fríos es clave para evaluar cómo contribuyen a mitigar las islas de calor urbanas, optimizar su durabilidad y mejorar su eficiencia energética. Sin embargo, su compleja interacción con variables climáticas (radiación solar, viento, humedad, temperatura del aire) requiere herramientas de simulación accesibles, que puedan integrar datos reales y evaluar diseños bajo múltiples escenarios. Tradicionalmente, herramientas como SUPERPAVE y el modelo LTPP han utilizado aproximaciones simplificadas o datos climáticos sintetizados, lo que limita su precisión en escenarios reales. Este enfoque, aunque valioso en etapas de diseño preliminar, depende de modelos climáticos teóricos (e.g., curvas de radiación solar aproximadas o perfiles de temperatura sinusoidal), los cuales no capturan la variabilidad horaria real, la altura del terreno o cambios de color por incorporación de materiales modificadores (Saleh & Trad, 2011; Abo-Hashema et al., s.f.). Otros autores han desarrollado modelos numéricos basados en diferencias o elementos finitos, que permiten simular con gran precisión el comportamiento térmico de pavimentos, pero requieren conocimientos avanzados de programación, una condición que no siempre está presente.

Conocer las temperaturas superficiales de los pavimentos es importante; no obstante, como el pavimento frío está destinado a mitigar las ICU, esta temperatura puede no ser indicativa de su eficacia real. La cualidad de "frío" en un pavimento debe juzgarse por su reducción del calor sensible que calienta el ambiente urbano (Qin & Hiller, 2014).

Para superar las limitaciones de las herramientas existentes, el objetivo principal de este trabajo es presentar y validar PML-Term, una herramienta computacional con interfaz accesible y de alta precisión para simular el comportamiento térmico de pavimentos urbanos bajo condiciones climáticas reales. Este modelo se desarrolló mediante un esquema de diferencias finitas (FTCS) que permite un modelado físico riguroso de estructuras multicapa, considerando propiedades térmicas y espesores variables. A diferencia de las aproximaciones simplificadas, PML-Term utiliza como input datos climáticos reales horarios (irradiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento) ingresados mediante un archivo CSV, lo que garantiza una alta fidelidad en las simulaciones.

En concreto, los objetivos específicos de este artículo son: (1) describir en detalle los fundamentos físicos y numéricos del modelo; y (2) validar su precisión contrastando las simulaciones con mediciones in situ de temperatura superficial en pavimentos convencionales. Los resultados de esta validación demuestran la capacidad de PML-Term para predecir con exactitud el desempeño térmico tanto de pavimentos convencionales como de tecnologías "frías", consolidándolo como una herramienta confiable para el diseño de infraestructuras urbanas sostenibles y la evaluación de estrategias de mitigación de islas de calor urbanas.

MODELO TÉRMICO

Balance térmico entre el pavimento y su entorno

Los pavimentos que están en contacto con los neumáticos y, a su vez, están expuestos a las condiciones climáticas, se colocan sobre una serie de capas que en su conjunto se conoce como paquete estructural. Imagínelo como una torta de varias capas, donde cada nivel cumple una función esencial para soportar vehículos, resistir el clima y garantizar durabilidad. En términos prácticos, consta de cuatro capas clave: i) capa de rodamiento, que es la superficie sobre la cual pasan los neumáticos y cuya función es resistir el desgaste diario, brindar adherencia y seguridad, ii) base, capa intermedia que va debajo de la capa de rodamiento y cuya función es soportar y distribuir el peso de los vehículos, evitando deformaciones, iii) subbase, es una capa que según el diseño puede o no estar, y su función es dar soporte adicional, iv) subrasante, que es el suelo natural el cual debe cumplir mínimos requisitos para soportar todas las capas superiores (Rivera, 2023).

El comportamiento térmico del pavimento se ve afectado conjuntamente por factores propios del material, como los parámetros termofísicos, y factores externos como el clima local. Los primeros incluyen el albedo y la emisividad de la capa de rodadura, así como la conductividad térmica, densidad y capacidad calorífica de todas las capas del paquete estructural, Figura 1.

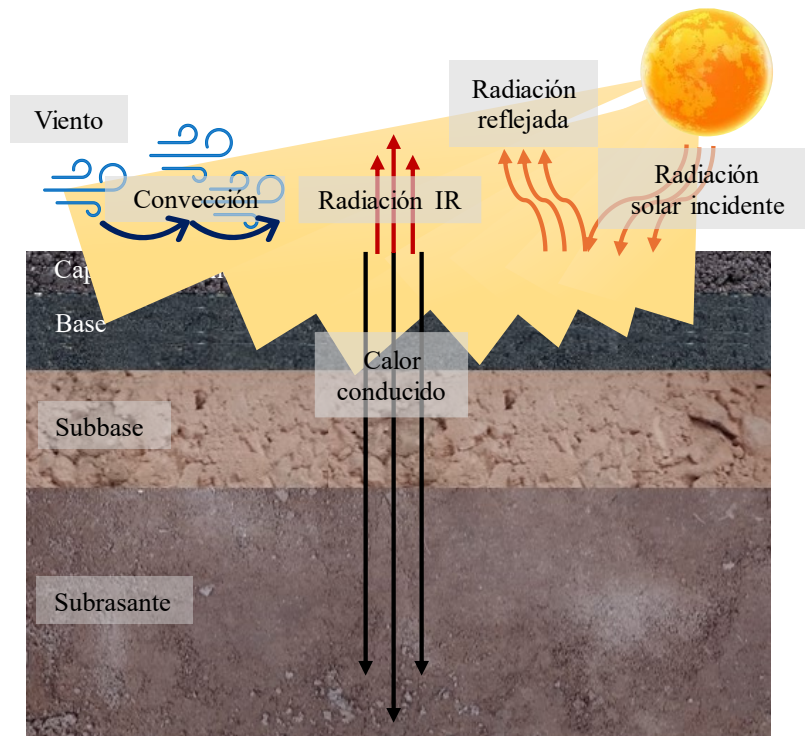


Figura 1: Balance energético en un paquete estructural.

La transferencia de calor entre el suelo y las capas subyacentes puede ser tratado como una transferencia de calor transitoria unidimensional en un cuerpo semiinfinito que obedece la Ec. 1:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

donde T (K) es el perfil de temperatura del suelo, Cp (J/kg.K) es el calor específico de cada capa, ρ (kg/m³) es la densidad de cada capa, t (s) es el tiempo, z (m) es la coordenada vertical que comienza desde la superficie del pavimento con el positivo hacia abajo, y k (W/(m.K)) es la conductividad térmica de cada capa.

La variación de temperatura del paquete estructural es impulsada por la irradiación solar incidente (I_{sol}) que, dependiendo del albedo (a) que tenga la superficie de la capa de rodadura, parte se refleja nuevamente hacia el entorno. El albedo es una propiedad óptica de la superficie del material, cuyos valores van de 0 a 1, e indica qué fracción de la irradiancia solar incidente sobre la superficie del pavimento es reflejada nuevamente hacia el entorno. Si el valor de albedo es igual a cero, el material absorbe el 100% de la irradiancia solar incidente, y si el valor de albedo es igual a uno, el material refleja el 100% de la irradiancia solar incidente. La irradiancia solar restante se absorbe y se divide en conducción, convección, y radiación infrarroja (IR). El equilibrio de energía en la superficie del suelo obedece a la Ec. 2 (Qin et al., 2019):

$$I_{sol} \cdot (1 - a) = -k \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} + h_c \cdot (T_s - T_{aire}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{cielo}^4) \quad (2)$$

donde el término a la izquierda del igual representa la irradiancia solar absorbida (W/m²), el primer término de la derecha representa el calor conducido en sentido vertical a través de las distintas capas

(W/m²), el segundo término representa el término convectivo (W/m²) siendo h_c (W/(m².K)) el coeficiente convectivo que se calcula según la Ec. 3, y T_s (K) la temperatura superficial de la capa de rodamiento:

$$h_c = \begin{cases} 5,6+4.v & v < 5 \\ 7,2.v^{0,78} & v \geq 5 \end{cases} \quad (3)$$

donde v (m/s) es la velocidad del viento.

El tercer término de la Ec. 2 es la radiación IR neta (W/m²), donde ϵ es la emisividad superficial de la capa de rodamiento, σ es la constante de Stefan-Boltzmann cuyo valor es de $5,67 \times 10^{-8}$ (W/(m².K⁴)), y T_{cielo} es la temperatura del cielo calculada según la Ec. 4. La emisividad superficial es un parámetro del material, con valores de 0 a 1, que indica cuanto se asemeja el comportamiento de un cuerpo caliente al comportamiento de un cuerpo negro, siendo un cuerpo negro un objeto teórico que absorbe toda la radiación electromagnética que incide sobre sí y, al mismo tiempo, un emisor perfecto de radiación térmica. La temperatura del cielo es la temperatura promedio derivada de la superficie del suelo en estudio y la temperatura en la troposfera superior, donde el contenido de vapor de agua es mínimo (Cabrera et al., 2025).

$$T_{\text{sky}} = \epsilon_{\text{sky}}^{0,25} \cdot T_{\text{aire}} \quad (4)$$

donde la emisividad del cielo (ϵ_{sky}) se calcula según la Ec. 5:

$$\epsilon_{\text{sky}} = 0,754+0,0044.T_{\text{rocio}} \quad (5)$$

donde T_{rocio} (°C) se calcula según la Ec. 6:

$$T_{\text{rocio}} = \frac{b_0 \cdot \gamma}{(a_0 - \gamma)} \quad (6)$$

donde $a_0 = 17,3$, $b_0 = 237,7$, y $\gamma = a_0 \cdot T_{\text{aire}} / (b_0 + T_{\text{aire}}) + \ln(H/100)$, siendo H la humedad ambiente, y T_{aire} está en °C.

Hipótesis fundamentales utilizadas en el modelo numérico

El modelo se basa en las siguientes hipótesis físicas y numéricas:

1. Unidimensionalidad vertical: el flujo de calor ocurre exclusivamente en dirección vertical (profundidad), despreciando efectos laterales.
2. Materiales homogéneos e isotrópicos: cada capa del pavimento tiene propiedades térmicas constantes (k , ρ , C_p) sin variación espacial.
3. Balance energético superficial completo: la superficie incluye todos los mecanismos de transferencia: irradiación solar, radiación térmica, convección y conducción.
4. Subsuelo como reservorio infinito: temperatura constante en la frontera inferior (condición Dirichlet), modificable por el usuario.
5. Sin transferencia de masa: no se considera humedad ni cambios de fase en el pavimento.

Ecuación de Transporte de Calor

La ecuación gobernante es la ecuación de calor unidimensional transitoria, Ec. 7:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (7)$$

donde $\alpha = k/(\rho \cdot C_p)$ es la difusividad térmica (m²/s).

Condiciones de borde

Superficie ($z = 0$):

$$I_{\text{sol}} \cdot (1 - a) = -k \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} + h_c \cdot (T_s - T_{\text{aire}}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{\text{cielo}}^4) \quad (8)$$

Fondo ($z = L$):

$$T(z = L) = T_{\text{subsuelo}} \quad (\text{Dirichlet}) \quad (9)$$

Modelo numérico: esquema explícito de diferencias finitas (FTCS) para simulación térmica de pavimentos

Para resolver la Ec. 7 que es una ecuación diferencial parcial, se implementa el esquema Forward-Time-Central-Space (FTCS), un método explícito de diferencias finitas que discretiza el dominio espacial y temporal mediante una malla estructurada (Alebraheem, 2017). Para discretizar el dominio, el pavimento con espesor total L , se divide en N nodos espaciales separados por $\Delta z = L/(N-1)$. El tiempo se discretiza en pasos Δt , donde T_i^n denota la temperatura en el nodo i ($0 \leq i \leq N-1$) y tiempo $t = n \cdot \Delta t$. El esquema FTCS aproxima las derivadas mediante diferencias finitas:

- derivada temporal: $\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t}$,
- derivada espacial: $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \approx \frac{T_{i-1}^n - 2 \cdot T_i^n + T_{i+1}^n}{(\Delta z)^2}$

Al discretizar las ecuaciones, se obtiene que para los nodos internos ($1 \leq i \leq N - 2$):

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \frac{\Delta t}{(\Delta z)^2 \cdot \rho_i \cdot C_{p,i}} \left[k_{i+\frac{1}{2}} \cdot (T_{i+1}^n - T_i^n) - k_{i-\frac{1}{2}} \cdot (T_i^n - T_{i-1}^n) \right] \quad (10)$$

Donde $k_{i\pm 1/2}$ son conductividades interfaciales calculadas por medias armónicas que aseguran la continuidad del flujo térmico en interfaces entre materiales distintos, ya que el flujo conductivo debe conservarse cuando hay discontinuidades en propiedades térmicas (por ejemplo, transición asfalto-base granular).

$$k_{i+\frac{1}{2}} = \frac{2 \cdot k_i \cdot k_{i+1}}{k_i + k_{i+1}} \quad (11)$$

En la superficie ($i = 0$):

$$T_0^{n+1} = T_0^n + \frac{\Delta t}{\rho_0 \cdot C_{p,0} \cdot \Delta z} \cdot \left[I_{\text{sol}} \cdot (1 - a) - \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_0^{n,4} - T_{\text{cielo}}^4) - h_c \cdot (T_0^n - T_{\text{aire}}) + k_{\frac{1}{2}} \cdot \frac{T_1^n - T_0^n}{\Delta z} \right] \quad (12)$$

donde el término $k_{\frac{1}{2}}$ es la conductividad térmica efectiva en la interfaz entre la capa superficial y la primera capa adyacente.

Fondo ($i = N - 1$):

Correspondiente a una condición Dirichlet que considera el subsuelo como reservorio térmico infinito.

$$T_{N-1}^{N+1} = T_{\text{subsuelo}} \quad (13)$$

Condición de Estabilidad:

La estabilidad del esquema FTCS exige satisfacer el criterio de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL):

$$\Delta t \leq \frac{(\Delta z)^2}{2 \cdot \alpha_{\max}}, \alpha_{\max} = \max_i \left(\frac{k_i}{\rho_i \cdot C_{p,i}} \right) \quad (14)$$

Garantizando que el número de Fourier local ($Fo = \alpha \cdot \Delta t / (\Delta z)^2$) sea $\leq 0,5$. Este requisito limita Δt pero asegura que errores de truncamiento no comprometan la solución.

VALIDACIÓN DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN

La validación del modelo de simulación térmica se realizó mediante comparación con datos experimentales recogidos in situ durante un período de cuatro días consecutivos. Las mediciones se efectuaron sobre una muestra asfáltica compactada, cuyas propiedades ópticas críticas se determinaron experimentalmente:

- Albedo superficial: 0,05 (medido con piranómetro Kipp & Zonen CMP3, según ASTM E1918A modificada por (Akbari et al., 2008)
- Emisividad superficial: 0,91 (medida con cámara termográfica Testo 865 y termocuplas tipo K, según ASTM E1933-99^a)

La densidad de la mezcla se cuantificó en laboratorio, obteniendo un valor de 2322 kg/m³. Los parámetros termofísicos restantes se adoptaron de literatura técnica especializada (Correa et al., 2003):

- Conductividad térmica: 1,00 W/(m·K)
- Calor específico: 920 J/(kg·K)

La configuración experimental incluyó un sustrato aislante de poliestireno expandido (telgopor) de 0,10 m de espesor, con conductividad térmica de 0,032 W/(m·K) y densidad de 26 kg/m³. Esta estratificación se replicó fielmente en el simulador mediante un modelo de dos capas (ver Tabla 1):

Tabla 1: configuración de sistema multicapas.

Capas	Espesor (m)	K (W/(m.K))	$ \rho $ (kg/m ³)	Cp (J/(kg.K))
Capa 1	0,05	1	2322	920
Capa 2	0,10	0,032	26	1100

La Figura 2 presenta la comparación temporal de las temperaturas simuladas y medidas a lo largo del ciclo diario completo. Se observa una correspondencia casi perfecta entre ambas series de datos en todos los períodos evaluados, capturando el modelo con alta fidelidad la dinámica del proceso térmico, incluyendo la magnitud de los máximos térmicos y la evolución de las transiciones. Los patrones de calentamiento y enfriamiento muestran una sincronización destacable, evidenciando la capacidad del simulador para reproducir la respuesta térmica real del sistema bajo las condiciones de contorno definidas.

Para una evaluación cuantitativa, la Figura 3 muestra el diagrama de dispersión de los valores medidos (eje X) frente a los simulados (eje Y), incluyendo la línea de igualdad 1:1 (45°) como referencia teórica. El análisis de regresión lineal forzado al origen (0,0) arrojó un coeficiente de determinación excepcional ($R^2 = 0,9979$), confirmando numéricamente la robustez y precisión global del modelo.

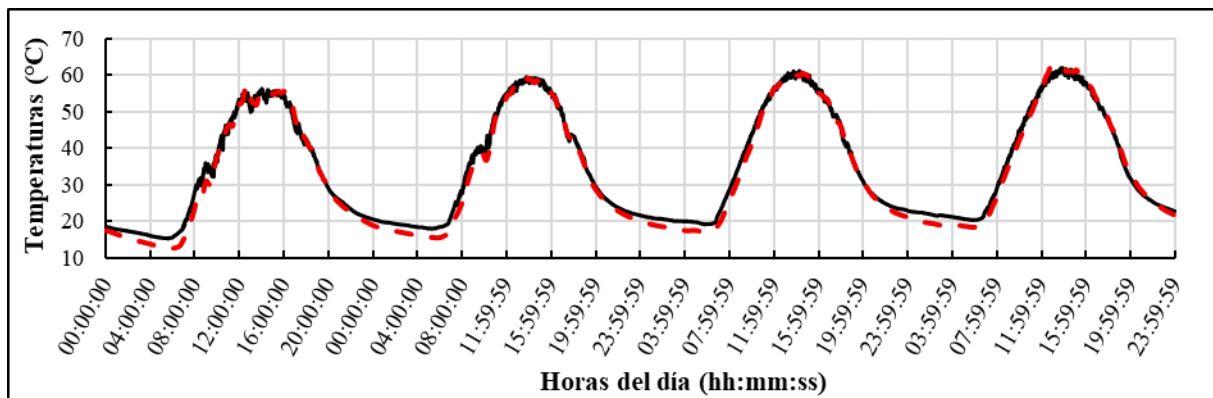


Figura 2: Comparación entre temperaturas superficiales registradas (línea continua negra) y temperaturas superficiales simuladas (línea discontinua roja) durante cuatro días del mes de enero de 2025.

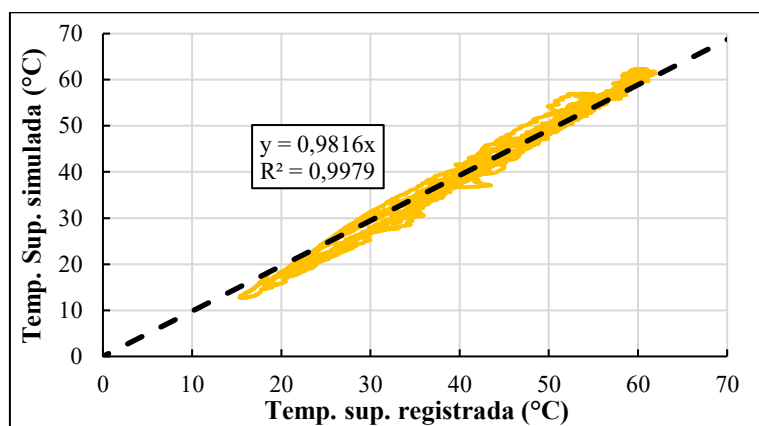


Figura 3: Correlación entre valores de temperatura superficial simulados y valores de temperatura superficial registrados en campo.

BREVE DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN PML-Term

El usuario inicia cargando un archivo CSV con datos climáticos históricos que deben incluir: fecha/hora, temperatura del aire, velocidad del viento, humedad ambiente, irradiación solar y temperatura superficial medida. Simultáneamente, configura el pavimento definiendo el número de capas (entre 1 y 10) y sus propiedades termofísicas individuales: espesor, conductividad térmica, densidad y calor específico. El sistema incluye validaciones automáticas que verifican la estabilidad numérica; si el paso temporal (Δt) o el número de nodos no cumplen el criterio de estabilidad FTCS ($\Delta t \leq \Delta z^2 / (2\alpha)$), se genera una alerta y se ajusta automáticamente el Δt máximo permitido. Para mayor precisión en el análisis térmico interno, el usuario puede activar la función de extracción de datos a profundidades personalizadas (ej: 0.05 m, 0.15 m). Cabe destacar que para tener más precisión en los resultados obtenidos internamente, se recomienda incrementar el número de nodos, lo que mejora la precisión de temperaturas internas, pero incrementa el tiempo de cálculo proporcionalmente.

Luego de realizar la simulación, los resultados se despliegan en tiempo real en la pestaña "Gráficos", organizados en seis visualizaciones integradas: 1) Temperaturas (superficial simulada, aire ambiente y rocío), 2) Flujos energéticos (radiación absorbida, convectiva, radiativa, conductiva y flujo neto), 3) Humedad relativa, 4) Irradiación solar, 5) Velocidad del viento, y 6) Conducción en capas específicas. La pestaña "Análisis Paramétrico" almacena históricos de simulaciones, permitiendo comparar cómo variaciones en conductividad térmica, albedo, emisividad, densidad, espesor y calor específico afectan a las temperaturas máximas y mínimas mediante la utilización de gráficos interactivos. Cada simulación exitosa genera una nueva pestaña numerada (ej: "Simulación 1"), donde se reportan: temperaturas extremas, energías acumuladas (radiativa, convectiva, conductiva) y desgloses horarios personalizables (por defecto 06-14h, 14-20h, 20-06h). Adicionalmente, el usuario puede exportar todos los datos a Excel

con un clic, incluyendo series temporales completas y resultados agregados por intervalos horarios ajustables.

CONCLUSIONES

El modelo numérico implementado en PML-Term demuestra una precisión excepcional al predecir temperaturas superficiales de pavimentos, validado mediante comparación con datos experimentales recogidos in situ durante cuatro días consecutivos. El coeficiente de determinación $R^2 = 0.9979$ obtenido en la regresión lineal forzada al origen, junto con la coherencia visual en la dinámica térmica (Figura 2), confirma la robustez del esquema FTCS y la fidelidad en la replicación de los procesos de transferencia de calor (conducción, convección, radiación).

PML-Term supera las limitaciones de herramientas convencionales (SUPERPAVE, LTPP) al integrar datos climáticos reales en formato CSV y permitir el modelado personalizado de pavimentos multicapa (hasta 10 capas). Su interfaz gráfica intuitiva, combinada con funciones avanzadas como análisis paramétrico automático, extracción de datos a profundidades personalizadas y generación de reportes exportables, lo posiciona como una herramienta accesible para no expertos en la evaluación de estrategias de mitigación de ICU y optimización de diseños de pavimentos fríos.

La capacidad de PML-Term para simular el desempeño térmico de pavimentos modificados (altos albedo/emisividad) bajo condiciones climáticas reales lo convierte en un recurso estratégico para la toma de decisiones en urbanismo resiliente. Al cuantificar la reducción de calor sensible emitido a la atmósfera urbana, el software permite priorizar diseños que equilibren durabilidad, eficiencia energética y mitigación de ICU, contribuyendo directamente a la reducción del impacto ambiental en entornos urbanos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte financiero de UTN-FRLP. PC agradece la beca doctoral otorgada por CONICET.

REFERENCIAS

- Abo-Hashema, M., Mousa, R., Al-Zedjali, S., Al Balushi, Q., Metwally, M., & Al-Rashdi, M. (s.f.). Development of Oman Performance Grade Paving Map for SUPERPAVE Asphalt Mix Design. doi:<https://www.ljmu.ac.uk/%7E/media/files/ljmu/about-us/faculties-and-schools/asphalt-conference/papers/asphalt/asphalt/doi-10,-d-,1515ijpeat20160033.pdf?la=en>
- Akbari, H., Levinson, R., & Stern, S. (2008). Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assemblies. *Solar Energy*, 82(7), 648-655. doi:[gttp://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2008.01.001](http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2008.01.001)
- Alebraheem, J. (2017). Forward Time Centered Space Scheme for the Solution of Transport Equation. *International Annals of Science*, 2, págs. 1-5.
- ASTM E1918. (2006). Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field.
- ASTM E1933. (2006). Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers.
- Cabrera, P., Botasso, G., & Castro Luna, A. (2025). Contribution of an asphalt pavement modified with TiO₂ to the moderation of the Urban Heat Island (UHI). *DYNA*, 237(92), 80-88. doi:<https://dx.doi.org/10.15446/dyna.v92n237.119489>
- Correa, E., Flores Larsen, S., & Lesino, G. (2003). ISLA DE CALOR URBANA: EFECTO DE LOS PAVIMENTOS. INFORME DE AVANCE. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 11-25.
- Gong, X., Liu, Q., Lv, Y., Shuaichao, C., Wu, S., & Ying, H. (2023). A systematic review on the strategies of reducing asphalt pavement temperature. *Case Studies in Construction Materials*, 18. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01852>

- Martinez, A., López-Montero, T., Miró, R., & Villar, R. (2024). PAVIMENTOS REFLECTANTES PARA REDUCIR EL EFECTO DE LAS ISLAS DE CALOR URBANAS. *Memoria técnica XXII CILA de Granada*, (págs. 1489-1510).
- Pascual Muñoz, P., Castro-Fresno, D., Serrano-Bravo, P., & Alonso-Estebanez, A. (2013). Thermal and hydraulic analysis of multilayered asphalt pavements as active solar collectors. *Applied Energy*, *111*, 324-332. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.013>
- Qin, Y., & Hiller, J. (2014). Understanding pavement-surface energy balance and its implications on cool pavement development. *Energy and Buildings*(85), 389-399. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.076>
- Qin, Y., Hiller, J., & Meng, D. (2019). Linearity between Pavement Thermophysical Properties and Surface Temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *11*(31). doi:[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002890](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002890)
- Rivera, J. (2023). *Apuntes sobre pavimentos en vías de bajo volumen de tránsito - Tomo I*. Buenos Aires: edUTecNe.
- Saleh, A., & Trad, M. (2011). Generation of asphalt performance grading map for Egypt based on the SUPERPAVE program. *Construction and Building Materials*, *25*, 2248-2253. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.009>
- Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(26), 224-240. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>
- Wang, X., Li, S., Chen, P., Li, F., Hu, X., & Hua, T. (2022). Photocatalytic and antifouling properties of TiO₂-based photocatalytic membranes. *materials today chemistry*, *23*, 100650. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2021.100650>

THERMAL SIMULATOR FOR URBAN PAVEMENTS WITH USER-FRIENDLY INTERFACE

ABSTRACT: Predicting pavement surface temperatures is key to assessing how cool pavements contribute to mitigating urban heat islands, optimizing material durability, and improving energy efficiency in built environments. However, their complex interaction with climatic variables (solar radiation, wind, humidity) requires accessible numerical simulation tools capable of integrating real-world data and evaluating structural designs under multiple scenarios. This work addresses this challenge by developing an interactive program that combines an energy balance model (conductive, convective, and radiative flows) with an intuitive graphical user interface (GUI). The software, developed in Python, allows users to upload historical climate series in CSV format and simulate pavement thermal evolution, considering opto-thermal properties such as albedo, emissivity, thickness, density, thermal conductivity, and specific heat. The interface, designed for non-expert users, facilitates comparing multiple structural configurations and quantifying thermal sensitivity to changes in key variables. Validated with experimental data, the program emerges as a versatile tool for decision-making in climate-resilient urban design, reducing environmental impact and prioritizing solutions that balance technical performance and environmental sustainability.

Keywords: thermal modeling, urban heat island, graphical interface, sustainable pavements, Python.