

BENEFICIOS DE LA MITIGACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANA EN UNA MEGALÓPOLIS EN EXPANSIÓN

Miguel Angel Altamirano del Carmen¹, Francisco Estrada^{1,2}, Bernardo A. Bastien-Olvera¹, Rodrigo Muñoz Sánchez¹, Oscar Calderón Bustamante¹
maltamirano@pincc.unam.mx. Autor/a correspondiente.

¹ Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático y Programa de Investigación en Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

² Institute for Environmental Studies, Vrije Universiteit, Amsterdam, Netherlands

Palabras clave: Mitigación, WRF, beneficio ambiental y social, UHI

1) INTRODUCCIÓN

En las ciudades habita más del 50% de la población mundial, alcanzando el 68% para 2050 (Naciones Unidas, 2019). Las ciudades son el centro de desafíos emergentes para las personas que allí viven. Los cambios en el uso del suelo y la infraestructura construida causan cambios en el balance energético de las ciudades (Grimm et al., 2008), haciéndolas notablemente más cálidas que sus alrededores rurales. Esto se define como el efecto de isla de calor urbana (UHI) (Oke, 1987). El efecto de UHI aumenta los extremos de calor y la propensión a eventos climáticos extremos (Huang et al., 2018), lo que provoca impactos adversos en el bienestar humano, la salud pública, la demanda energética, entre otros (Gong et al., 2012). Identificar adecuadamente la ubicación y la magnitud del efecto UHI permite a los tomadores de decisión tomar en cuenta el aumento de la exposición. Así que, caracterizar la UHI es un paso inicial para gestionar el calentamiento local (Xu et al., 2022). Evaluar la UHI y las medidas de mitigación en zonas urbanas de rápido crecimiento que concentran a millones de personas es fundamental para el desarrollo y la planificación urbana, con el fin de garantizar el bienestar humano y ambiental en el contexto urbano y de cambio climático (Dang y Kim, 2023).

Este trabajo tiene dos objetivos: 1) cuantificar los efectos de la expansión urbana en la magnitud de la UHI modelada con el modelo atmosférico regional WRF para una megalópolis tropical de rápido crecimiento, y 2) evaluar el efecto ambiental de la reducción de la UHI mediante medidas de intervención para modificar el albedo urbano en el modelado numérico.

2) METODOLOGÍA

La Megalópolis del Valle de México (MVM) es el área de estudio con una elevación heterogénea reflejada en el amplio rango de temperaturas del aire (Figura 1). Integra seis estados (Hidalgo, Ciudad de México, Morelos, Puebla, Estado de México y Tlaxcala) y contiene desde pequeñas zonas urbanas hasta la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMVM). En la MVM viven aproximadamente 30.4 millones de habitantes: el 79.5% de la población total de los seis estados en 2015 y una cuarta parte de la población de México (CONAPO, 2024).

Usamos la temperatura superficial media anual (TSM) modelada con el modelo WRF entre 2040 a 2060 para un dominio anidado con resolución de 2.5km x 2.5km centrado en la MVM, de acuerdo con la configuración descrita por Altamirano et al. (2025). El WRF es ampliamente utilizado para estudiar el impacto de la urbanización y medidas de reducción de la UHI (2023). El WRF es forzado por un modelo climático de circulación global (Giorgi, 1990) e incluyó la

proyección de la expansión urbana en la MVM al año 2050 (Mendoza et al., 2025) bajo el escenario SSP 3-7.0.

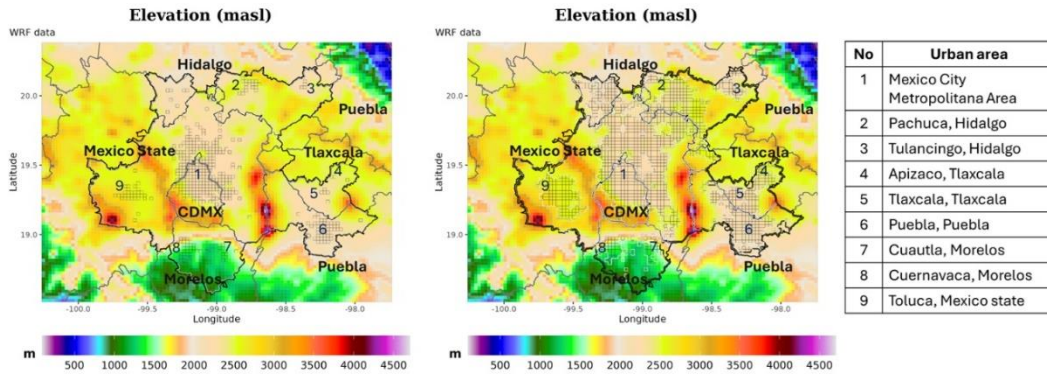


Figure 1. Elevación en la zona de estudio en el periodo histórico (panel izquierdo) y expansión urbana proyectada a mediados de siglo (panel derecho). Contorno en gris son estados, en negro la MVM y en malla áreas urbanas.

Entre las medidas comunes referidas en la literatura para reducir la intensidad de la UHI están el cambio de superficies reflectantes en techos y pavimentos (He, 2019). Se incrementaron los valores promedio del campo del albedo para todas las celdas urbanas en el WRF como una aproximación simplificada para representar el efecto de medidas de reducción de la UHI. El albedo se modificó en las celdas de malla en valores en torno al 60% (Wang et al., 2022) mediante

$$A_{(i,j,t)} = A_{WRF(i,j,t)} + 0.45 * \delta_{(i,j)} \quad (1)$$

Donde $A_{WRF(i,j,t)}$ es el albedo en cada celda de malla i, j en el mes t , $\delta_{(i,j)} = 1$ en celdas urbanas y 0 en celdas con uso de suelo diferente. La intensidad de la UHI se calculó con

$$UHI_{(i,j)} = T_{(i,j)} - \bar{T}_{rur} \quad (2)$$

$T_{(i,j)}$ es la TSM ajustada por elevación de acuerdo con Altamirano et al. (2025) para cada celda de malla i, j , \bar{T}_{rur} es el promedio de las celdas rurales en el dominio con la TSM ajustada. El uso de suelo rural agrupa usos de suelo diferente al urbano y a cuerpos de agua en el WRF.

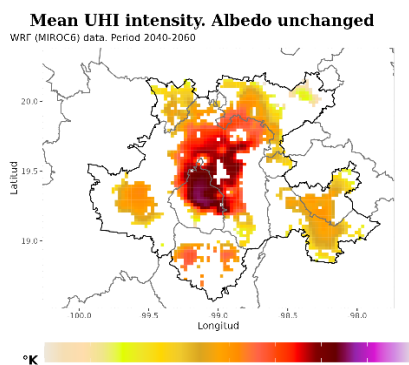


Figura 2. Intensidad de la UHI en el horizonte cercano considerando expansión urbana y sin intervención en el albedo.

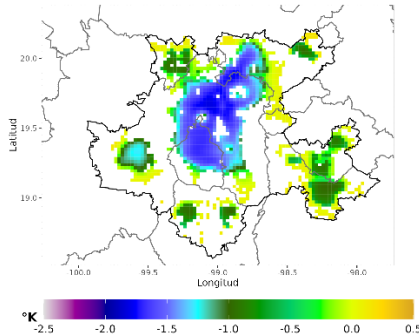
3) RESULTADOS

La intensidad de la UHI en el horizonte cercano 2040-2060 es entre 0°C y 0.3°C mayor que en el período de referencia en las zonas urbanas de la MVM cuando no hay expansión urbana y el albedo no es intervenido. La UHI se intensifica cuando se incluye la expansión de las celdas urbanas en el WRF. La UHI sería entre 2.5°C y 3.2°C en la mayor parte de la ZMVM en el horizonte cercano, con máximos del centro al norte de la Ciudad de México, y entre 1.5°C y 2.1°C en Puebla y Toluca (Figura 2). Por lo tanto, la UHI en el horizonte cercano es hasta 0.5°C más intensa en las celdas actualmente ocupadas por áreas urbanas, particularmente en la dirección de

expansión urbana, y aumenta proporcionalmente con la expansión de nuevas áreas. Se esperan aumentos adicionales de la UHI entre 1.5°C y 2.5°C con respecto al periodo de referencia en nuevas áreas urbanas al norte y noreste de la ZMVM, al noroeste de Puebla, al sur de Pachuca y alrededor de Toluca.

La intensidad de la UHI se reduce al intervenir el albedo en el 60% de las celdas urbanas en el WRF en el horizonte cercano, con respecto al total de celdas proyectadas en la expansión urbana. El beneficio ambiental sería una reducción de la UHI entre 0.8°C y 1.8°C en las nuevas

UHI intensity reduced. Modified albedo in 60% urban grid-cells
WRF (MIROC6) data. Period 2040-2060



áreas urbanas, en comparación con el escenario de expansión urbana sin intervención, y entre 0.9°C y 1.7°C en las superficies actualmente ocupadas por áreas urbanas. El efecto de la intervención se extiende a celdas urbanas vecinas, donde la proporción de la UHI sin intervención es de al menos el 85%. Los beneficios ambientales de regular áreas con nueva expansión urbana en el horizonte cercano, en comparación con un escenario de desarrollo urbano sin intervención en el albedo, serían entre 1.5°C y 2.2°C, además de conservar otros servicios ambientales y la biodiversidad.

Figura 3. Reducción en la UHI en el horizonte cercano al intervenir el albedo en el 60% de las celdas urbanas proyectadas, en comparación con un escenario sin intervención.

CITAS Y REFERENCIAS

- Altamirano del Carmen M.A., F. Estrada, B.A. Bastien-Olvera¹, R. Muñoz Sánchez, O. Calderón B., 2025:** Estimating Urban Heat Island Effect: Balancing Proximity and Comparability Through Altitude-Adjusted Temperature Analysis. Preprint.
- CONAPO, 2024:** Reconstrucción y proyecciones de la población de los municipios de México 1990-2040.
- Dang, L., y Kim, S., 2023:** An Analysis of the Spatial and Temporal Evolution of the Urban Heat Island in the City of Zhengzhou Using MODIS Data. *Applied Sciences*, 13(12), 7013.
- Giorgi, F., 1990:** Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *J. Climate*, 3, 941–963.
- Gong, P., Liang, S., Carlton, E.J., Jiang, Q., Wu, J., y Wang, L., 2012:** Remais, J.V. Urbanisation and health in China. *Lancet* 2012, 379, 843–852.
- Grimm, N.B., Faeth, S.H., Golubiewski, N.E., Redman, C.L., Wu, J.; Bai, X., y Briggs, J.M., 2008:** Global change and the ecology of cities. *Science* 2008, 319, 756–760.
- He, B.-J., 2019:** Towards the next generation of green building for urban heat island mitigation: Zero UHI impact building. *Sustainable Cities and Society* Article 101647
- Mendoza A., F. Estrada, J. Campo, O. Calderon, A. González, M.A. Altamirano del Carmen, 2025:** Land-Use Dynamics and Projections in Mexico's Valley Megalopolis. Submitted to *Journal of Land Use Science*
- Oke, T.R., 1987:** *Boundary Layer Climate*, 2nd ed.; Routledge: Abingdon, UK.
- Wang, W., Zhou, W., Ng, E.Y.Y., y Xu, Y., 2016:** Urban heat islands in Hong Kong: statistical modelling and trend detection. *Natural Hazards*, 83, 885-907.
- Xu, H., Li, C., Wang, H., Zhou, R., Liu, M., y Hu, Y., 2022:** Long-Term Spatio temporal Patterns and Evolution of Regional Heat Islands in the Beijing–Tianjin–Hebei Urban Agglomeration. *Remote Sens.* 2022, 14, 2478. <https://doi.org/10.3390/rs14102478>