



Evaluación del modelo Urban Weather Generator en clima árido y tropical: aplicaciones en Mendoza, Argentina y Campinas, Brasil

Evaluation of the Urban Weather Generator model in arid and tropical climates: applications in Mendoza, Argentina and Campinas, Brazil.

Noelia Alchapar

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE), CONICET
Parque General San Martín, Mendoza (CP 5500), Argentina
nalchapar@mendoza-conicet.gob.ar

Erica Correa

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE), CONICET
Parque General San Martín, Mendoza (CP 5500), Argentina
ecorrea@mendoza-conicet.gob.ar

Claudia Pezzuto

Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, PUC-Campinas
Rodovia D. Pedro I, km 136, Parque das Universidades, Campinas, SP 13086-900, Brazil
claudiapezzuto@puc-campinas.edu.br

Agnese Salvati

Brunel University London London, UK
agnese.salvati@brunel.ac.uk

Código del manuscrito: 07_001

Fecha de aceptación: 04/10/2019

Resumen

Los modelos climáticos son indispensables para la predicción del clima y para comprender las complejas interacciones entre el uso del suelo y la atmósfera. En este contexto, el trabajo tiene como objetivo investigar la sensibilidad del modelo urbano de balance energético, denominado Urban Weather Generator v4.1 (UWG) a la aplicación de distintas estrategias de mitigación de la isla de calor urbana, a distintas condiciones climáticas, y analizar su capacidad de representar las condiciones micro climáticas de una situación urbana particular. El estudio de caso se llevó a cabo en un barrio social bajo dos contextos climáticos: clima desértico –Bwk, Köppen- (ciudad de Mendoza-Argentina) y clima tropical –Cwa, Köppen- (ciudad de Campinas-Brasil). Para cada clima fueron simulados doce escenarios que modifican sus parámetros morfo-materiales (nivel de albedo de los materiales, presencia y ausencia de vegetación y densidad edilicia). Los resultados mostraron que la temperatura del aire que predice el modelo UWG no es significativamente sensible a los cambios resultantes de la aplicación de distintas estrategias en contextos urbanos de igual densidad edilicia, sin embargo, sí muestra sensibilidad a la variación de la densidad edilicia ($\Delta T_a \leq 1.3^\circ\text{C}$) y del contexto climático. La mayor sensibilidad del modelo UWG se registró sobre las temperaturas superficiales de los diferentes elementos de la envolvente urbana, a la modificación de distintas estrategias y contextos climáticos. La máxima diferencia de



temperatura superficial fue registrada en el escenario con alto albedo de la ciudad de la ciudad de Mendoza, con una disminución de temperatura superficial de techos de 28°C en alta densidad.

Palabras claves: Urban Weather Generator; sensibilidad del modelo; microclima urbano; parámetros materiales; morfología urbana.

Abstract

Climate models are indispensable tools for predicting and understanding the complex interactions between urban land use and atmosphere. This paper presents an analysis of the sensitivity the Urban Weather Generator v4.1 (UWG) model for two Latin American cities. A social housing neighborhood was used as a case study and tested in two climatic contexts: desert climate -Bwk, Köppen- (Mendoza-Argentina) and tropical climate -Cwa, Köppen- (Campinas-Brazil). For each climate, twelve scenarios were simulated modifying three morpho-material parameters: the albedo of materials, the presence and absence of vegetation and the building density. The results showed that the air temperature predicted by the UWG model is not significantly sensitive to the changes resulting from the application of different strategies in urban contexts of equal building density, and it does show sensitivity to the variation of the building density and the climatic context ($\Delta T_a \leq 1.3$ ° C). However, the model shows greater sensitivity to the application of different strategies and changing climatic conditions in terms of the value of surface temperatures of the different elements of the urban envelope - walls, ceilings and floors. The maximum difference in surface temperature was estimated for the high albedo scenario in the city of Mendoza, with a decrease of 28°C in the surface temperature of roofs.

Key words: Urban Weather Generator; model sensitivity; urban microclimate; material parameters; urban morphology.

Introducción

El fenómeno de isla de calor urbana (UHI) tiene consecuencias energéticas, ambientales y sociales, al mismo tiempo que deteriora la calidad de vida de los ciudadanos. La magnitud exacta de la intensidad de la isla de calor depende en gran medida de la selección de las estaciones rurales o suburbanas de referencia (Santamouris, 2015). El conocimiento de su magnitud y sus características es un requisito previo para una planificación urbana orientada a la mitigación y adaptación al cambio climático. Los estudios relacionados con el clima urbano relatan que el aumento de la temperatura urbana está directamente atribuido a las acciones antrópicas y esa elevación de la temperatura agrava el consumo de energía para refrigeración, aumenta el pico demanda eléctrica, intensifica problemas de contaminación, causan discomfort humano y problemas de salud y desencadena enfermedades relacionadas con el calor y muertes prematuras en las ciudades (Doyon; Bélanger; Gosselin, 2008; Mirzaei; Haghighat, 2010). Las estrategias para mitigar el calentamiento urbano se sustentan en dos principios básicos: incrementar la cobertura vegetal de los espacios urbanos (Bowler et al., 2010; Chang & Li, 2014; Perini & Magliocco, 2014) y trabajar con las propiedades ópticas de los materiales.

Los modelos urbanos de simulación desempeñan un papel importante en el diseño, análisis y optimización de la forma y tecnología de las ciudades a fin de optimizar el uso de la energía y disminuir el impacto sobre el medio ambiente. Sin embargo, debido a la extrema complejidad de los entornos construidos y a la gran cantidad de parámetros que interactúan en una ciudad, es difícil obtener una representación precisa de los mismos. Por lo tanto, la calibración de los modelos climáticos y el análisis de su capacidad predictiva tienen un interés particular, y es necesario evaluar en qué medida los modelos de simulación son capaces de representar las situaciones reales, antes de implementar los resultados y conclusiones que derivan de su uso al proceso de toma de decisiones en la planificación urbana (Mao et al., 2018).

Esta investigación fue desarrollada bajo dos contextos climáticos, el de la ciudad de Mendoza, Argentina y el de la ciudad de Campinas, Brasil. La isla de calor urbana promedio de Mendoza es de 6.5°C, con picos máximos de 10°C durante el período nocturno, como consecuencia de las características morfológicas de la ciudad, la



intensa forestación de cañones urbanos y los materiales utilizados en las envolturas urbanas (Correa, 2006). En Campinas la isla de calor alcanza valores máximos de 6 °C (Pezzuto, 2007). Según clasificación climática de Köppen, Mendoza, Argentina corresponde a un clima desértico con estepa fría (BWk), mientras que Campinas, Brasil, tiene clima tropical con invierno seco y caluroso verano (Cwa).

En la presente investigación se evalúa el grado de sensibilidad del modelo climático Urban Weather Generator v4.1 (UWG), desarrollado por Bueno et al. (2013a), al modificar parámetros morfo-materiales en dos ciudades latinoamericanas. Para ello, se simularon 24 escenarios que modifican su porcentaje de vegetación urbana, nivel de albedo de materiales de la envolvente y densidad edilicia.

Estado del arte del problema

Además de los enfoques de observación, los modelos matemáticos se desarrollaron para resolver problemas climáticos urbanos, incluida la UHI. Entre estos, el modelo de balance energético (EBM) y los modelos dinámicos de fluidos (Fluid Dynamics-CFD) se mostraron más confiables y con resultados satisfactorios en la academia internacional (Mirzaei & Haghighat, 2010). Las herramientas de evaluación del clima urbano pueden clasificarse en cinco escalas de enfoque: los modelos meteorológicos de meso escala, los modelos de escala local, los modelos de microclima, los modelos energéticos de edificios y los modelos térmicos humanos.

Entre los modelos computacionales a escala micro-climática más relevantes se encuentra ENVI-met (Bruse & Fleer, 1998), esta herramienta se basa en el modelo CFD (Computational Fluid Dynamics) que tiene en cuenta la radiación de ondas cortas y largas, la transpiración, la evaporación y el flujo de calor sensible de la vegetación y el agua, así como las condiciones de contorno dinámico (temperatura, velocidad del viento, humedad), generando parámetros climáticos urbanos corregidos (Sola *et al.*, 2018). En su nueva versión, ENVI-met 4.0, implementó un modelo de vegetación 3D que posibilita describir formas variadas de plantas y distribución especial de hojas, resultando un mayor ajuste en el porcentaje de visión de cielo (SVF) del cañón urbano. También introdujo ecuaciones que consideran la inercia térmica de las paredes y el techo de la envolvente (Yang *et al.*, 2013; Acero & Herranz-Pascual, 2015). En investigaciones previas (Alchapar *et al.*, 2017), demostraron la capacidad de predicción de ENVI-met para reproducir las temperaturas urbanas bajo diferentes escenarios que aplican estrategias de mitigación de la ICU en dos ciudades latinoamericanas. Este trabajo demostró que los escenarios que registran menores temperaturas de aire tienen mayor cantidad de vegetación urbana y altos niveles de albedo en las superficies de techo y pisos.

La complejidad del modelo ENVI-met, impacta en forma negativa ya que extiende los tiempos de simulación. Otra desventaja, asociada a la realidad económica de la ciencia latino americana, es: la dificultad de disponer equipos computacionales de alta prestación, sumado a los elevados costos de adquisición de la licencia del software.

Además, ENVI-met, es una herramienta que requiere una interfaz gráfica de usuario (GUI) separada de las interfaces de modelado 3D utilizadas por los diseñadores para modelar diseños en masa. Esto presenta una limitación para un diseño arquitectónico integrado con consideraciones de energía, especialmente cuando los usuarios necesitan modificar o incluso simplificar sus geometrías de construcción para cumplir con la plataforma de simulación de energía o UHI (Nakano *et al.*, 2015). Sin embargo, los nuevos recursos de la versión de ENVI-met edición invierno 2018 permiten importar una variedad de formatos de modelado 3D, lo que facilita la interfaz con otras bases de datos.

En el presente trabajo, como una alternativa al software ENVI-met, se busca determinar la confiabilidad de los resultados obtenidos con un modelo de balance energético urbano de versión libre propuesto por Bueno et al. (2013a) denominado Urban Weather Generator (UWG), que con mínimos requerimientos de tiempo estima la temperatura del aire en la capa de dosel urbano (UCL), utilizando informaciones meteorológicas recogidas en una estación ubicada en áreas rurales o suburbanas.

El programa UWG se basa en el Modelo de Equilibrio Energético de la Ciudad (Town Energy Balance Model (TEB) (Masson, 2000) e incluye un modelo de energía del edificio derivado de algoritmos de EnergyPlus (Bueno *et al.*, 2011, 2013). UWG, también puede estimar la relación de energía entre los edificios y el clima urbano. Las investigaciones recientes utilizaron el UWG en datos de Basel (Suiza), Toulouse (Francia) y Singapur, mostrando un error medio de cerca de 1K (Bueno *et al.*, 2013, 2014). El modelo calcula la temperatura horaria del aire en el cañón urbano, dada una descripción paramétrica del área urbana. Investigaciones de Salvati, Monti, Coch & Cecere, 2019 compararon las predicciones del modelo UWG con observaciones reales en diferentes emplazamientos urbanos de Roma y Barcelona. Los resultados mostraron que el modelo UWG es capaz de capturar la tendencia general de la temperatura de una ciudad, especialmente en contextos urbanos homogéneo.

Metodología

Características de las ciudades analizadas

Las ciudades de Mendoza y de Campinas fueron seleccionadas como áreas de estudio para cuantificar la capacidad predictiva del UWG al modificar parámetros morfo-materiales. En Tabla 1, se describen las características principales de cada ciudades, los datos fueron obtenidos desde Mendoza_Aero_Observations, 2019 y CEPAGRI/UNICAMP, 2019, respectivamente.

Tabla 1 Condiciones geográficas y climáticas de las ciudades evaluadas. Fuente: Elaboración propia, 2019.

Características	Mendoza, Argentina	Campinas, Brasil
Ubicación	32°54 '48 "S, 68 °50 '46 "O; 750 m sobre nivel mar.	22°53'20 "S, 47°04 ' 40 "O; 680m sobre el nivel del mar.
Superficie	368 km ²	794 km ²
Población	1, 089,000 habitantes.	1,194,094 habitantes
Clima según Köppen clasificación (Kottek <i>et al.</i> , 2006)	Desértico con estepa fría (<i>BWk</i>)	Tropical con inviernos secos y veranos calurosos (<i>Cwa</i>)
Zona Climática ASHRAE	2B Cálido seco	2A Cálido húmedo
Precipitaciones anuales	218mm	1372 mm.
Radiación solar máxima diaria anual	1006 W/m ²	814 W/m ²
Radiación solar máxima diaria estival	1089 W/m ²	961 W/m ²
Velocidad de viento a 10m de altura	1.9m/s (sureste)	2.2 m/s (sureste)
Temperatura media anual	16.50 °C	21.40°C,
Temperatura máximas promedio	24.50 °	27.10 °
Temperatura mínimas promedio	9.60 °C	15.60 °C

Cabe destacar que entre ambas ciudades hay una diferencia aproximada de 10°C de latitud (Mendoza: 32.54° y Campinas: 22.53°C) esta distancia al ecuador impacta directamente en la altura solar y en consecuencia sobre la intensidad de radiación solar. En la figura 1 se grafica la distribución diaria de radiación global horizontal y temperatura de aire durante el mes de enero para cada ciudad. Estos datos fueron obtenidos del repositorio de Climate.OneBuilding.Org.

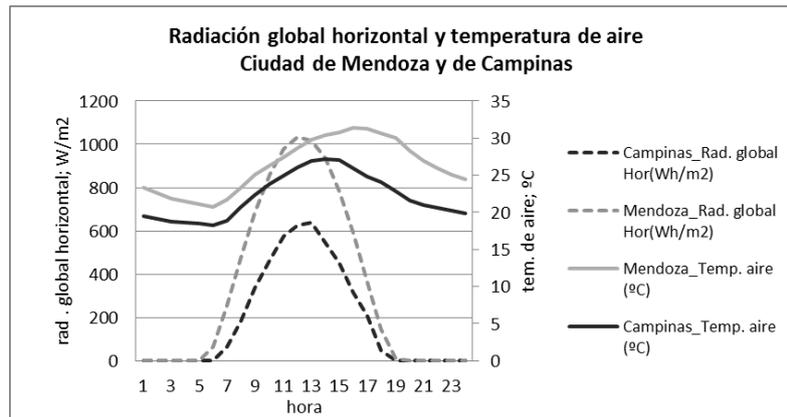


Figura 1. Radiación global horizontal y temperaturas de aire de la ciudad de Mendoza y Campinas.

Descripción del área de estudio

Fue seleccionado el Barrio Cementista como caso de estudio debido a que es una tipología residencial de vivienda social en ambas ciudades latinoamericanas. Es un barrio de baja densidad edilicia y uso residencial, ubicado en la localidad de Las Heras. El área está conformada por canales viales de 16 a 20 m de ancho y canales peatonales de 3 m de ancho. La altura edilicia promedio es de 3.2 m, con una relación altura edilicia-ancho de canal vial (H/W) que oscila entre los 0.15 y 0.19. La especie *Morus alba blanco* es la forestación urbana predominante. (Sosa et al., 2017).

Respecto a la configuración material, las características ópticas de los elementos verticales (fachadas) registran un albedo medio ($\hat{\alpha}$) de 0.25. Los techos están recubiertos predominantemente con tejas cerámicas color terracota ($\hat{\alpha} = 0.35$). En los canales viales peatonales se releva un uso generalizado de baldosas tipo calcáreo con un $\hat{\alpha}$ medio de 0.30, mientras que los canales vehiculares están constituidos por concreto con un $\hat{\alpha}$ medio de 0.25 (Alchapar & Correa, 2016).

Monitoreo y obtención de datos micro-climáticos

Con el propósito de obtener el comportamiento ambiental del sector se colocaron 6 sensores fijos dentro del canal vial, que registran cada 15 minutos los valores de temperatura de aire (T_a), humedad relativa (HR) y humedad absoluta en el mes de enero del 2014. Cada sensor de tipo H08-003-02 se ubicó a una altura de 2 m desde el nivel de la calle de acuerdo a lo sugerido en (Oke, 2006), dentro de una caja blanca de PVC perforada, con el objeto de evitar la irradiación y asegurar una adecuada circulación de aire. En la figura 2 se describen las temperaturas medias, mínimas y máximas registradas en cada punto observado.

Los valores de albedo de los materiales de la envolvente urbano edilicia se obtuvieron con un albedómetro tipo CM3 Kipp & Zonen y junto a un par de máscaras de color blanco y negro, de acuerdo al método desarrollado por (Akbari, Levinson & Stern, 2008).

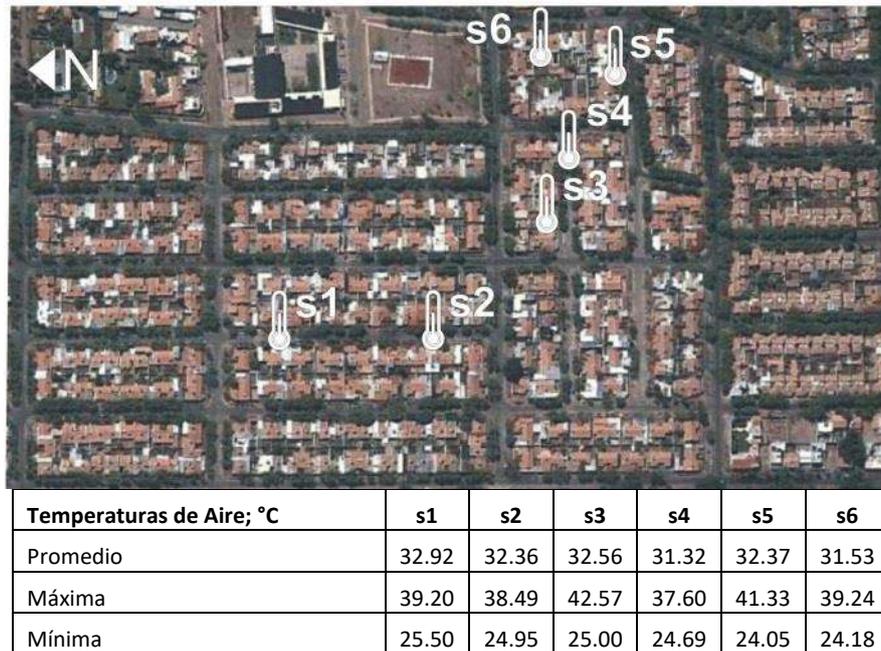


Figura 2. Vista aérea del Barrio Cementista, Mendoza-Argentina y ubicación de sensores de monitoreo. Fuente: Google Earth, 2014.

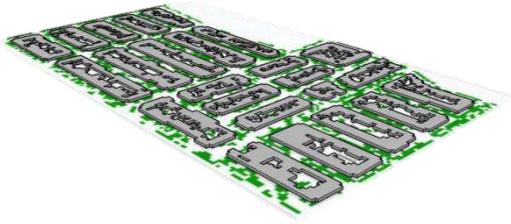
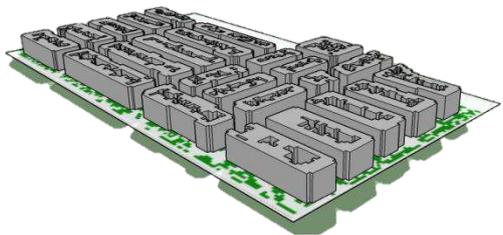
Escenarios propuestos

En orden de alcanzar los objetivos planteados fueron simulados 12 escenarios para cada contexto climático, con las siguientes características morfo-materiales. En Tabla 2 se describen las diferentes configuraciones que combinan niveles de albedo de la materialidad de la envolvente, presencia o ausencia de vegetación y densidad edilicia.

Construcción del modelo matemático UWG v4.1

El modelo UWG está constituido por cuatro componentes de cálculo: el "Rural Station Model", "Vertical Diffusion Model", "Urban Boundary-layer model" y "Urban Canopy and Building Energy Model". Mediante la utilización de los datos del clima rural como entrada, el modelo calcula la temperatura de aire por hora en el cañón urbano, dada una descripción paramétrica del área urbana. El modelo numérico UWG se basa en el balance energético de la superficie urbana, teniendo en cuenta las interacciones recíprocas entre los edificios y el clima urbano. En particular, Bueno et al. (2013) establece para el cálculo de energía del dosel urbano los siguientes elementos en el balance energético: (a) el calor fluye desde las paredes, ventanas y piso; (b) el intercambio de calor sensible entre el aire del cañón y la capa superior de la atmósfera; (c) el flujos de calor por efecto de sistemas de refrigeración y calefacción del edificio; (d) otras fuentes de calor antropogénicas; y (e) el intercambio de calor radiante entre el aire del cañón y el cielo. La radiación solar recibida por las paredes y la carretera se calcula con las ecuaciones utilizadas en TEB (Masson, 2000), considerando un cañón urbano orientado a la media. La versión 4.1 del modelo introdujo varios cambios (Mao et al., 2017). Con respecto al cálculo de la radiación, se incluyó una corrección de la componente directa para tener en cuenta que el archivo climático EPW indica el valor de la radiación recibida por una superficie perpendicular al rayo solar. También se actualizó el cálculo del balance de la radiación de onda larga. La absorción de radiación infrarroja por el aire del cañón, que resultó muy sobrevaluada en la primera versión del modelo, se eliminó, así como los coeficientes de linealización de la Ecuación de Stefan-Boltzmann en el cálculo de radiación de onda larga entre las paredes, la calle, los techos y el cielo.

Tabla 2. Características morfo-materiales de escenarios propuestos. Fuente: Elaboración propia, 2019.

					
BAJA DENSIDAD (H/W=0.16)					
VEGETADO		Cod.	SIN VEGETAR		Cod.
â bajo	techos: 0.20	<i>L1.a</i>	â bajo	techos: 0.20	<i>L1.b</i>
	calles: 0.20			calles: 0.20	
	paredes: 0.20			paredes: 0.20	
â alto	techos: 0.80	<i>L2.a</i>	â alto	techos: 0.80	<i>L2.b</i>
	calles: 0.75			calles: 0.75	
	paredes: 0.80			paredes: 0.80	
â combinado	techos: 0.80	<i>L3.a</i>	â combinado	techos: 0.80	<i>L3.b</i>
	calles: 0.75			calles: 0.75	
	paredes: 0.20			paredes: 0.20	
					
ALTA DENSIDAD (H/W=1.8)					
VEGETADO		Cod.	SIN VEGETAR		Cod.
â bajo	techos: 0.20	<i>H1.a</i>	â bajo	techos: 0.20	<i>H1.b</i>
	calles: 0.20			calles: 0.20	
	paredes: 0.20			paredes: 0.20	
â alto	techos: 0.80	<i>H2.a</i>	â alto	techos: 0.80	<i>H2.b</i>
	calles: 0.75			calles: 0.75	
	paredes: 0.80			paredes: 0.80	
â combinado	techos: 0.80	<i>H3.a</i>	â combinado	techos: 0.80	<i>H3.b</i>
	calles: 0.75			calles: 0.75	
	paredes: 0.20			paredes: 0.20	

Recolección de datos micro-climáticos y parámetros de ingreso

Para realizar el cálculo, UWG necesita dos archivos de entrada:

1. Un archivo meteorológico rural en formato EnergyPlus (.epw)
2. Un archivo .xism que describe las características del sitio urbano de referencia incluyendo 4 categorías de parámetros: meteorológicos, urbanos, de vegetación y de tipologías edilicias.

Los parámetros meteorológicos describen las características de la capa límite urbana por la ciudad de referencia (Mao et al., 2017, Bueno, 2013b). Los parámetros urbanos incluyen factores morfo-materiales como la geometría urbana (promedio de altura edilicia, proporción vertical respecto a la horizontal y compacidad urbana), nivel de albedo de los materiales (calle, fachadas y techos) y parámetros de naturaleza antropogénica como el calor producido por el tráfico. Los parámetros de vegetación definen el porcentaje de cobertura vegetal y de árboles y el albedo de la vegetación. Finalmente, los parámetros de tipología edilicia definen el porcentaje en el área de referencia de diferentes tipos de edificio (bloque de departamentos, restaurantes de medio o grande tamaño, hoteles de medio o grande tamaño etc.). (Tabla 3)

Tabla 3. Parámetros de ingreso al simulador UWG. Fuente: Elaboración propia, 2019.

SITIO DE REFERENCIA	Mendoza-Argentina		Campinas-Brasil	
Latitud	32°54'48"S		22°53'20"S	
Longitud	68°50'46"O		47°04'40"O	
ÁREA URBANA	H/W= 0.16	H/W= 1.80	H/W= 0.16	H/W= 1.80
Promedio de altura edilicia (metros)	3.2	30	3.2	30
Proporción vertical respecto a la horizontal	0.30	6.13	0.30	6.13
Cobertura vegetal (%)	26	26	26	26
Forestales urbanos (%)	23	23	23	23
Calor sensible antropogénico (W/m ²) **	4.5	20	4.5	20
EDIFICIO *				
Punto de ajuste de enfriamiento diurno (°C)	26		26	
Punto de ajuste de enfriamiento nocturno (°C)	35		35	
Punto de ajuste de calefacción diurna	20		20	
Punto de ajuste de calefacción nocturna	20		20	
ELEMENTOS				
Albedo de pared	0.20 - 0.80		0.20 - 0.80	
Albedo de techo	0.20 - 0.80		0.20 - 0.80	
Albedo de calles	0.20 - 0.75		0.20 - 0.75	

* Datos por defecto; ** Dato de Correa, 2006.

Resultados

Análisis de datos monitoreados versus simulados con el modelo UWG

La Figura 3 grafica las temperaturas de aire monitoreadas por los sensores en el área de estudio (ver s1, 2, 3, 4, 5,6 en Figura 2) en relación con la temperatura de la estación rural monitoreada en el día de referencia (Ta_rural_día_ref.); las temperaturas de aire observadas en la estación rural obtenidas del archivo climático de días típicos de Mendoza-Argentina (Ta_rural_EPW); y las temperaturas de aire calculada por el modelo dentro del canal vial (Ta_UCL) en el caso base -L1.a-.

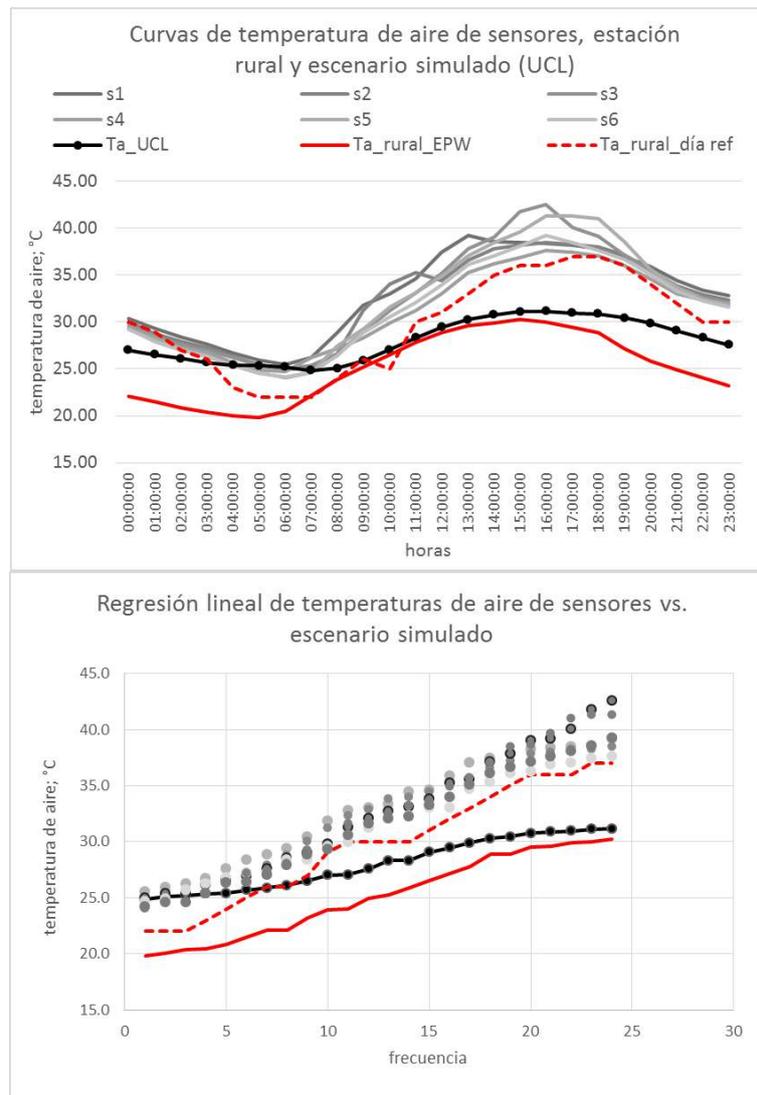


Figura 3. Curvas de temperatura de aire rural (Ta_{rural}), temperatura de aire de sensores (s1, 2, 3, 4, 5,6) y curva corregida por el modelo UWG (Ta_{UCL}) dentro del canal vial. Elaboración propia, 2019.

Al contrastar los datos calculados por el modelo UWG (Ta_{UCL}) con las monitoreadas por los sensores en los puntos fijos dentro del barrio, se observa que el simulador predice con relativo grado de ajuste las temperaturas mínimas en la gráfica de distribución lineal de temperaturas, con diferencias de temperatura de aire mínimas de $\Delta Ta \leq 0.65^\circ\text{C}$. Sin embargo, el modelo muestra problemas en la predicción de las temperaturas de aire máximas, con $\Delta Ta \leq 11.4^\circ\text{C}$. Este efecto de aplanamiento de la curva simulada respecto al comportamiento real del cañón urbano, se debe a que los sensores ubicado in situ registraron la temperatura de aire durante el mes de enero del año 2014, mientras que el modelo UWG introduce en su cálculo un archivo climático (epw) que contiene los datos climáticos típicos del mes de enero registrados durante un período de 10 años.

En relación a los diferentes escenarios simulados, los resultados mostraron que el modelo UWG presenta una baja sensibilidad sobre las temperaturas de aire en relación a la aplicación de distintas estrategias en los escenarios simulados, con diferencias menores al $\Delta Ta \leq 1.3^\circ\text{C}$.

Sin embargo, si evaluamos la respuesta del modelo UWG para predecir el efecto urbano sobre las temperaturas de aire, se observa una alta precisión. Debido a que el modelo calcula una isla de calor promedio

de 5.5°C dentro del canal vial (ver Ta_rural_EPW vs. Ta_UCL en Figura 3). Este valor es muy cercano a los registrados en investigaciones previas llevadas a cabo por Correa 2006 en la ciudad de Mendoza, donde se monitoreó una isla de calor promedio de 6.5°C.

Desempeño térmico del simulador UWG según escenarios

Sobre las temperaturas de aire (Ta)

En la figura 4 se grafican las curvas de temperatura de aire del canal vial (Ta_UCL) del total de los escenarios planteados.

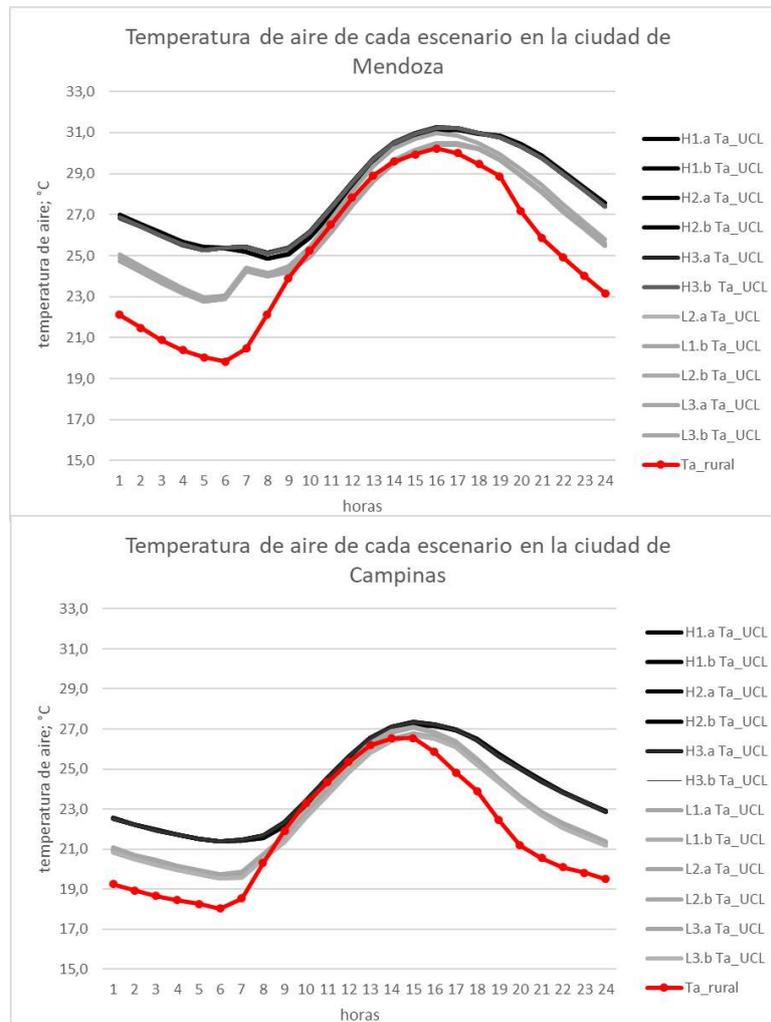


Figura 4. Curvas de temperatura de aire según escenarios que modifican su nivel de albedo, porcentaje de vegetación y densidad edilicia. Elaboración propia, 2019.

Luego de simular los 24 escenarios propuestos en ambas ciudades no se observan modificaciones significativas en las Ta_UCL en el total de las configuraciones morfo-materiales. En ambas ciudades el modelo UWG no muestra alta sensibilidad al incremento de los niveles de albedo de la materialidad ni al porcentaje de vegetación (ΔTa_{UCL} entre escenarios $\leq 0.5^\circ\text{C}$ para ambas ciudades). La modificación de comportamientos en la Ta_UCL se hace evidente sólo cuando se eleva la densidad urbana, principalmente durante el período de enfriamiento, con ΔTa_{UCL} entre escenarios $\leq 1.3^\circ\text{C}$ para ambas ciudades. Este resultado confirma el papel principal de los parámetros geométricos en el cálculo de UWG que ya se destacó en estudios precedentes en

ciudades del Mediterráneo y de Sur América (Salvati et al. 2019, Palme et al. 2018, Salvati et al. 2017, Palme et al 2016).

Según los datos simulados, en Mendoza, la ICU en la densidad alta alcanza 5.4°C y en la baja los 2.7°C. Mientras que en Campinas, la ICU es de 3.4°C en alta densidad y de 1.5°C en baja densidad. Es decir que la magnitud del impacto de la presencia de la ciudad es mayor en la ciudad de Mendoza (Tabla 4).

Tabla 4. Registros de temperaturas de aire de la estación de referencia (T_a rural) y del canal vial (T_a _UCL) para cada escenario simulado en la ciudad de Mendoza-Argentina y Campinas-Brasil. Elaboración propia, 2019.

Escenarios	Mendoza			Campinas		
	Max	Min	Prom	Max	Min	Prom
Rural	38	10	25.1	32.4	12.5	21.8
L1.a	38	12.3	26.9	32.4	13.9	23
L1.b	37.9	12.3	26.9	32.5	13.8	23
L2.a	37.5	12.3	26.7	32	13.9	22.8
L2.b	37.5	12.2	26.5	31.9	13.9	22.7
L3.a	37.5	12.3	26.7	32	13.9	22.8
L3.b	37.5	12.2	26.5	31.9	13.9	22.7
H1.a	38.9	13.9	28	32.5	15.1	24
H1.b	38.9	13.9	28	32.5	15.1	24
H2.a	38.7	14	28.1	32.7	15.1	24
H2.b	38.7	14	28.1	32.6	15.1	24
H3.a	38.7	14	28.1	32.7	15.1	24
H3.b	38.7	14	28.1	32.6	15.1	24

Sobre las temperaturas superficiales (T_s)

Para evaluar la sensibilidad de modelo numérico sobre la temperatura superficial (T_s) de la envolvente urbano-edilicia, se organizó el análisis según los siguientes tres parámetros:

Densidad edilicia –Escenarios: *L= baja densidad; H=alta densidad-*

- **Mendoza:** Al comparar el desempeño térmico superficial de los elementos de la envolvente se observa que, en alta densidad, por efecto de las sombras edilicias arrojadas, la T_s _calle y T_s _paredes son menores que en baja densidad. Registrando diferencias de temperatura máximas entre escenarios con idéntica configuración vegetal y material de ΔT_s _calle $\leq 11.9^\circ\text{C}$ y ΔT_s _pared $\leq 3.4^\circ\text{C}$ (ver H1.b vs. L1.b en Tabla 4 y Fig.5.a).
- **Campinas:** La misma tendencia ocurre en la ciudad de Campinas, donde el escenario de alta densidad registra menores temperaturas superficiales de calles y paredes. ΔT_s _calle $\leq 7^\circ\text{C}$, (ver H1.b=35°C vs. L1.b=42°C) y ΔT_s _pared $\leq 3.4^\circ\text{C}$ (ver H1.b=31.4°C vs. L1.b=38.4°C en Tabla 4 y Fig.5.b).

Estos resultados sugieren que, para el período de verano, el impacto de la modificación de la densidad es mayor en Mendoza que en Campinas, debido a la alta heliofanía y escasa velocidad de viento.

El modelo estima la demanda de energía requerida para mantener ciertas condiciones interiores. Para evaluar el consumo de energía asociado al uso de sistemas de climatización y el calor liberado del equipo externo, el modelo aplica el coeficiente de rendimiento (COP) constante (Bueno, 2013).

En la figura 4 se evidencia que, en ambos contextos climáticos, la temperatura superficial del techo se ve fuertemente modificada entre baja y alta densidad (L1, L2 versus H1, H2) a pesar que la radiación incidente es la misma. Esto se debe al gran impacto que producen los sistemas de acondicionamiento tipo “Split” ubicados en las azoteas de los edificios. En este punto, surge otro elemento determinante en el balance energético de un canal vial, que es la cantidad y ubicación de los aires acondicionados en fachada o techos. Los equipos de aire acondicionado con salidas al exterior actúan como fuentes concentradas de calor, creando en un entorno estratificado una columna térmica sobre ellos.

Nivel de albedo –Escenarios: 1= albedo bajo; 2= albedo alto; 3= albedo combinado-:

- **Mendoza:** Al contrastar los escenarios que modifican sus niveles de albedo y mantienen el resto de los parámetros iguales, presenta un gran impacto sobre las temperaturas de techo. Los escenarios con niveles de albedo bajo (1) elevan más sus temperaturas superficiales en el total de las envolventes. Se registran $\Delta T_{s_calle} \leq 6.2$ (ver L1.a=43.6°C vs. L2.a/L3.a=37.4°C); $\Delta T_{s_paredes} \leq 4.1$ (ver L1.a=41.2°C vs. L2.a/L3.a=37.1°C en Tabla 4 y Fig.5); $\Delta T_{s_techos} \leq 13^\circ\text{C}$ en baja densidad y hasta 28°C en alta densidad (ver L1.a=53.8°C vs. L2.a/L3.a=40.5°C y H1.a=70.5°C vs. H2.a/H3.a=42.6°C en Tabla 4 y Fig.5.a).
- **Campinas:** Al igual que en Mendoza, se registran mayores temperaturas superficiales los escenarios con niveles de albedo bajo (1). Las diferencias resultantes son: $\Delta T_{s_calle} \leq 5.5^\circ\text{C}$ (ver L1.a=37.1°C vs. L2.a/L3.a=31.6°C); $\Delta T_{s_paredes} \leq 3.5$ (ver L1.a=34.7°C vs. L2.a/L3.a=31.2°C); $\Delta T_{s_techos} 12.9 \leq ^\circ\text{C}$ en baja densidad y hasta 24.3°C en alta densidad (ver L1.a=47.1. °C vs. L2.a/L3.a=34.2°C y H1.a=61.1°C vs. H2.a/H3.a=36.8°C en Tabla 4 y Fig.5.b).

El modelo UWG muestra los siguientes patrones de comportamiento en ambas ciudades. Los escenarios con niveles de albedo alto (2) y combinado (3) tienen idénticos comportamientos. Es decir que el modelo numérico no muestra sensibilidad en este aspecto. Además, la modificación de niveles de albedo impacta en mayor grado sobre las temperaturas superficiales -principalmente en alta densidad edilicia-, en segundo lugar, en paredes y por último en calles de escenarios baja densidad.

Al modificar los niveles de albedo, las dos ciudades muestran iguales tendencias de disminución de temperaturas superficiales, sin embargo, el potencial de impacto es mayor en Mendoza debido la alta radiación solar durante el período estival.

Presencia de vegetación –Escenarios: a= con vegetación; b=sin vegetación-:

- En ambas ciudades la presencia de verde urbano modifica el desempeño térmico de las superficies de calle ($\Delta T_{s_calle} \leq 5^\circ\text{C}$) en escenarios de baja densidad con nivel de albedo bajo (ver L1.a vs L1.b en Mendoza y Campinas en Tabla 6). Este hecho se debe a que el porcentaje de verde y árboles en los escenarios evaluados es relativamente bajo (23 y 26 % respectivamente). Otro factor determinante, es que en el modelo físico de UWG, sólo se consideran los fenómenos de transferencia de calor (como el enfriamiento evaporativo) que ellos producen sobre el aire, sin incluir el efecto de las sombras que los árboles proyectan sobre las superficies de fachadas y techos.

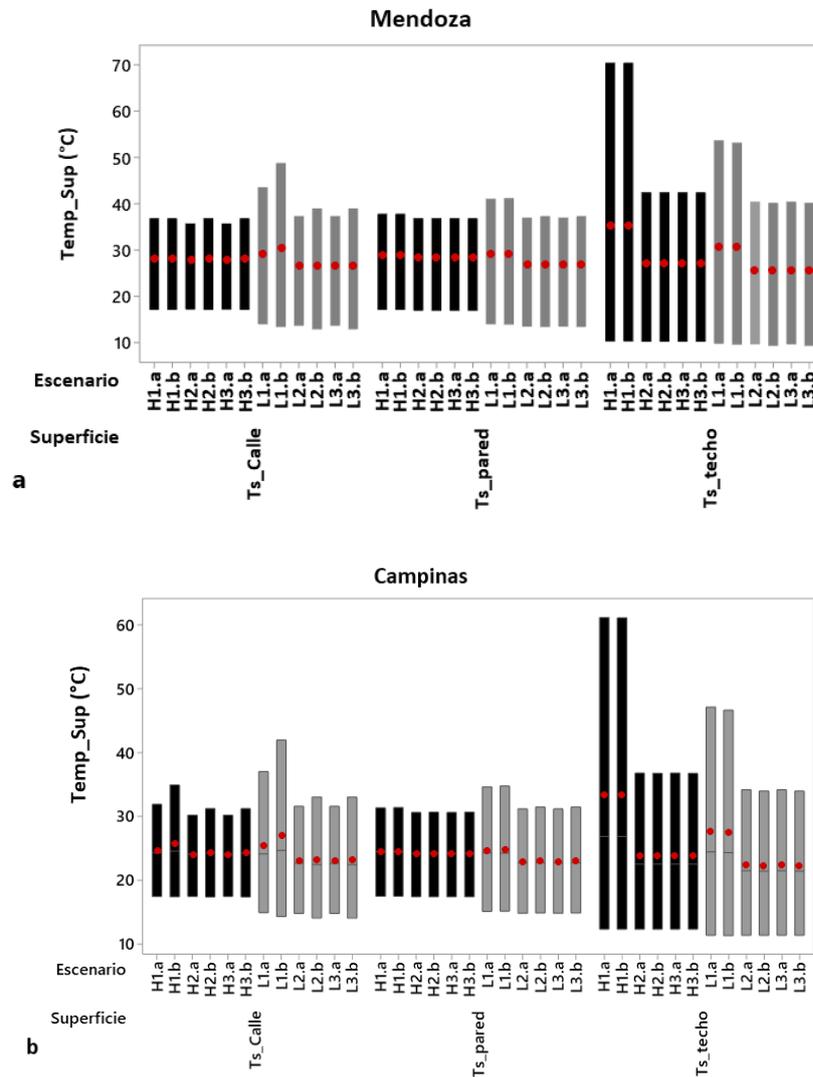


Figura 5. Diagrama de temperaturas superficiales promedio, máximas y mínimas de los escenarios estudiados. A. Ciudad de Mendoza. B. Ciudad de Campinas. Las columnas negras indican escenarios de alta densidad y las grises indican escenarios de baja densidad. Elaboración propia, 2019.

Tabla 5. Temperaturas superficiales verticales de fachadas (Ts_paredes) para cada escenario simulado en la ciudad de Mendoza-Argentina y Campinas-Brasil. Elaboración propia, 2019.

Escenarios	Mendoza			Campinas		
	Max	Min	Prom	Max	Min	Prom
L1.a	41.2	14	29.2	34.7	15.2	24.3
L1.b	41.3	14	29.2	34.8	15.2	24.3
L2.a	37.1	13.5	26.8	31.2	14.9	22.8
L2.b	37.4	13.5	26.9	31.5	15	22.8
L3.a	37.1	13.5	26.8	31.2	14.9	22.8
L3.b	37.4	13.5	26.9	31.5	15	22.8
H1.a	37.9	17.1	29	31.4	17.6	24.5
H1.b	37.9	17.1	29	31.4	17.6	24.5
H2.a	36.9	16.9	28.4	30.7	17.5	24.3

H2.b	37	16.9	28.4	30.7	17.5	24.3
H3.a	36.9	16.9	28.4	30.7	17.5	24.3
H3.b	37	16.9	28.4	30.7	17.5	24.3

Tabla 6. Temperaturas superficiales horizontales: techos (Ts_techo) y circulaciones vehiculares y peatonales (Ts_calle) para cada escenario simulado en la ciudad de Mendoza-Argentina y Campinas-Brasil. Elaboración propia, 2019.

Escenarios	Sup. Horizontal	Mendoza			Campinas		
		Max	Min	Prom	Max	Min	Prom
L1.a	Ts_calle	43.6	14	29.2	37.1	15.0	24.2
L1.a	Ts_techo	53.8	9.8	30.8	47.1	11.5	24.5
L1.b	Ts_calle	48.8	13.5	30.6	42	14.4	24.8
L1.b	Ts_techo	53.3	9.6	30.6	46.7	11.4	24.4
L2.a	Ts_calle	37.4	13.7	26.6	31.6	14.9	22.7
L2.a	Ts_techo	40.5	9.7	25.7	34.2	11.4	21.6
L2.b	Ts_calle	39.0	12.9	26.7	33.1	14.1	22.5
L2.b	Ts_techo	40.3	9.4	25.6	34	11.5	21.5
L3.a	Ts_calle	37.4	13.7	26.6	31.6	14.9	22.7
L3.a	Ts_techo	40.5	9.7	25.7	34.2	11.4	21.6
L3.b	Ts_calle	39.0	12.9	26.7	33.1	14.1	22.5
L3.b	Ts_techo	40.3	9.4	25.6	34.0	11.5	21.5
H1.a	Ts_calle	36.9	17.2	28.2	32.0	17.5	24.3
H1.a	Ts_techo	70.5	10.3	35.3	61.1	12.4	26.9
H1.b	Ts_calle	36.9	17.2	28.2	35	17.5	24.6
H1.b	Ts_techo	70.5	10.3	35.3	61.1	12.4	26.9
H2.a	Ts_calle	35.8	17.2	27.9	30.3	17.5	24.1
H2.a	Ts_techo	42.6	10.3	27.1	36.8	12.4	22.6
H2.b	Ts_calle	37.0	17.1	28.3	31.3	17.5	24.3
H2.b	Ts_techo	42.5	10.3	27.1	36.8	12.4	22.6
H3.a	Ts_calle	35.8	17.2	27.9	30.3	17.5	24.1
H3.a	Ts_techo	42.6	10.3	27.1	36.8	12.4	22.6
H3.b	Ts_calle	37.0	17.1	28.3	31.3	17.5	24.3
H3.b	Ts_techo	42.5	10.3	27.1	36.8	12.4	22.6

Discusión y Conclusiones

El modelo UWG es una herramienta muy eficiente en términos de tiempo de ejecución, construye bases de datos climáticas modificadas con los parámetros geométricos y morfológicos en una ciudad de referencia, en procesos de simulación muy cortos en comparación con otros simuladores urbanos. El modelo UWG resulta versátil y compatible con simuladores energéticos edilicios, como por ejemplo el EnegyPlus debido a que sus bases de datos tienen extensión *epw. Esta información permite una mayor veracidad y ajuste de estudios sobre el comportamiento térmico edilicio inserto en un entorno urbano, así como también, sobre el efecto de la isla de calor en la construcción de perfiles de consumo energético edilicio.



El modelo UWG tiene una gran capacidad para predecir de manera sensible el resultado de la aplicación de distintas estrategias de mitigación sobre las temperaturas superficiales de los elementos de la envolvente urbano-edilicia (paredes, techos y pisos). Siendo un conocimiento útil para determinar el grado de confort de un espacio urbano, así como también los posibles de ahorro energético en diferentes contextos climáticos. Debido a la rigurosidad climática estacional de la ciudad de Mendoza, la modificación de densidad y albedo registraron mayor potencial de impacto sobre las temperaturas superficiales que en Campinas. Por ejemplo, al elevar los niveles de albedo se registran disminuciones de temperatura superficial de techos de hasta 28°C en Mendoza y de 24.3°C en Campinas (En Mendoza H1.a=70.5°C vs. H2.a/H3.a=42.6°C y en Campinas H1.a=61.1°C vs. H2.a/H3.a=36.8°C). Este resultado evidencia el gran potencial que produce el nivel de albedo sobre las temperaturas superficiales del techo y en consecuencia sobre los consumos energéticos edilicios.

Otra fortaleza detectada en este trabajo, es que el modelo UWG puede reflejar el impacto del flujo de calor antropogénico derivado de la densificación edilicia, parámetro que la mayoría de los simuladores urbanos no considera en sus cálculos de balance, pero que sin embargo representan una importante herramienta de directrices urbanas.

Entre las debilidades detectadas, particularmente en los escenarios analizados en este trabajo, el modelo UWG mostró una baja sensibilidad a la modificación de las temperaturas de aire entre estrategias de mitigación del sobrecalentamiento urbano. Además, el modelo UWG no es sensible a la modificación de propiedades ópticas en paredes, debido a que los escenarios con alto albedo y con albedo combinado presentaron idénticos comportamiento, tanto en sus temperaturas de aire como superficiales. Ésta conclusión se apoya en hallazgos conseguidos en trabajos previos llevadas adelante por Alchapar et al. (2017), en los cuales se buscó determinar el beneficio térmico de estrategias de mitigación de ICU sobre la ciudad de Mendoza y Campinas mediante la utilización del software ENVI-met. La investigación con ENVI-met encontró diferencias de temperatura de aire entre escenarios de 3.5°C para Mendoza y de 5°C en Campinas.

Al modificar los parámetros de vegetación el modelo UWG mostró sensibilidad ($\Delta T_{s_calle}=5^{\circ}C$) en las temperaturas superficiales de calles sólo en los escenarios con bajo albedo y densidad para ambas ciudades. Este hecho se explica ya que en el cálculo del balance de energía del modelo UWG considera a la vegetación y a los árboles de manera simplificada, asumiendo que una fracción determinada de la radiación solar absorbida se transforma en calor latente y no contribuye al aumento de las temperaturas en el cañón (Mao et al., 2017). Además, supone que los árboles son más bajos que los edificios, entonces no participan en el cálculo de las temperaturas superficiales de techos y fachadas.

Para soslayar estas falencias, el modelo UWG está en continuo actualización y desarrollo. Resultando un programa robusto y operativo para la predicción de las condiciones climáticas urbanas y el análisis de las interacciones entre edificios y su entorno urbano.

Aunque esta investigación es de carácter inicial, el trabajo demostró que, para explicar los comportamientos de las superficies urbanas y las interacciones con el clima, es primordial la utilización de simulaciones climáticas con diferentes escalas de análisis. Es por ello que en trabajos futuros se propone utilizar el modelo de balance energético -UWG- en simultáneo con el modelo microclima -ENVI-met- para potenciar sus capacidades.

Agradecimientos

Este trabajo de investigación fue apoyado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica-ANPCyT- de Argentina, a través del Fondo de Investigación Científica y Tecnológica -FONCyT (PICT2017-3248) y la Fundación de Investigación del Estado de São Paulo - FAPESP (2019 / 10308-9).

Referencias

Acero, J. A. and Herranz-Pascual, K. (2015) A comparison of thermal comfort conditions in four urban spaces by



means of measurements and modelling techniques, *Building and Environment*. Elsevier Ltd, 93, pp. 245–257. doi: 10.1016/j.buildenv.2015.06.028.

Akbari, H., Levinson, R. and Stern, S. (2008) Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assemblies, *Solar Energy*, 82(7), pp. 648–655. doi: 10.1016/j.solener.2008.01.001.

Alchapar, N. L. *et al.* (2017) The impact of different cooling strategies on urban air temperatures: the cases of Campinas, Brazil and Mendoza, Argentina, *Theoretical and Applied Climatology*. Theoretical and Applied Climatology, 130(1–2), pp. 35–50. doi: 10.1007/s00704-016-1851-5.

Alchapar, N. L. and Correa, E. N. (2016) The use of reflective materials as a strategy for urban cooling in an arid “OASIS” city, *Sustainable Cities and Society*. Elsevier B.V., 27, pp. 1–14. doi: 10.1016/j.scs.2016.08.015.

Bowler, D. E. *et al.* (2010) Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence, *Landscape and Urban Planning*. Elsevier B.V., 97(3), pp. 147–155. doi: 10.1016/j.landurbplan.2010.05.006.

Bruse, M. and Fleer, H. (1998) Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model, *Environmental Modelling & Software*, 13(3–4), pp. 373–384.

Bueno, B. *et al.* (2011) Combining a Detailed Building Energy Model with a Physically-Based Urban Canopy Model, *Boundary-Layer Meteorology*, 140(3), pp. 471–489. doi: 10.1007/s10546-011-9620-6.

Bueno, B. *et al.* (2013a) The urban weather generator', *Journal of Building Performance Simulation*, 6(4), pp. 269–281. doi: 10.1080/19401493.2012.718797.

Bueno, B., Hidalgo, J., Pigeon, G., Norford, L., & Masson, V. (2013b). Calculation of air temperatures above the urban canopy layer from measurements at a rural operational weather station. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(2), 472–483. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-083.1>

Bueno, B. *et al.* (2014) Computationally efficient prediction of canopy level urban air temperature at the neighbourhood scale, *Urban Climate*. Elsevier Ltd, 9, pp. 35–53. doi: 10.1016/j.uclim.2014.05.005.

CEPAGRI/UNICAMP (2019) *Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura. Climatologia Campinas*. Available at: <https://www.cpa.unicamp.br/graficos>.

Correa E. (2006). "Isla de calor urbana. El caso del área metropolitana de Mendoza". Tesis doctoral. UNSA, Salta, Argentina.

Chang, C. R. and Li, M. H. (2014) Effects of urban parks on the local urban thermal environment, *Urban Forestry and Urban Greening*. Elsevier GmbH., 13(4), pp. 672–681. doi: 10.1016/j.ufug.2014.08.001.

Doyon, B., Bélanger, D. and Gosselin, P. (2008) The potential impact of climate change on annual and seasonal mortality for three cities in Québec, Canada, *International Journal of Health Geographics*, 7, pp. 1–12. doi: 10.1186/1476-072X-7-23.

Flores Asín, E. (2019) "Tecnologías verdes en zonas áridas. Diseño y evaluación energético-ambiental de sistemas de vegetación de aplicación en cubiertas edilicias". Tesis doctoral. UNSA, Salta, Argentina.

Garuma, G. F. (2018) Review of urban surface parameterizations for numerical climate models, *Urban Climate*. Elsevier, 24(April 2017), pp. 830–851. doi: 10.1016/j.uclim.2017.10.006.

IBGE (2019) *Cidades e Estados, Banco de dados Cidades: Informações sobre Municípios Brasileiros. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. Available at: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/campinas.html>.

Kottek, M. *et al.* (2006) World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated, *Meteorologische Zeitschrift*, 3(3), pp. 259–263. doi: 10.5194/hess-11-1633-2007.

Mao, J. *et al.* (2018) Optimization-aided calibration of an urban microclimate model under uncertainty, *Building and Environment*. Elsevier, 143(April), pp. 390–403. doi: 10.1016/j.buildenv.2018.07.034.

Mao, J., Yang, J. H., Afshari, A., & Norford, L. K. (2017). Global sensitivity analysis of an urban microclimate system under uncertainty: Design and case study. *Building and Environment*, 124, 153–170



- Masson, V. (2000) A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, *Boundary-Layer Meteorology*, 94(3), pp. 357–397. doi: 10.1023/A:1002463829265.
- Mendoza_Aero_Observations (2019) *Temperature Monitoring Station: MENDOZA AERO*. Available at: <http://berkeleyearth.lbl.gov/stations/151655>.
- Mirzaei, P. A. and Haghighat, F. (2010) Approaches to study Urban Heat Island e Abilities and limitations, *Building and Environment*. Elsevier Ltd, 45(10), pp. 2192–2201. doi: 10.1016/j.buildenv.2010.04.001.
- Nakano, A. et al. (2015) Urban Weather Generator – a Novel Workflow for Integrating Urban Heat Island Effect Within Urban Design Process, in *14th Conference of International Building Performance Simulation Association*. Hyderabad, India, pp. 1901–1908. doi: 10.1016/S1091853104001594.
- Oke, T. R. (2006) Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. IOM Report No. 81, WMO=TD No. 1250'.
- Palme, M., Inostroza, L., & Salvati, A. (2018). Technomass and cooling demand in South America: a superlinear relationship? *Building Research & Information*, 46(Issue 8: Urban form, density & microclimate), 864–880. <https://doi.org/10.1080/09613218.2018.1483868>
- Palme, M., Carrasco, C., & Lobato, A. (2016). Quantitative Analysis of Factors Contributing to Urban Heat Island Effect in Cities of Latin-American Pacific Coast. *Procedia Engineering*, 169, 199–206. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.024>
- Perini, K. and Magliocco, A. (2014) Urban Forestry & Urban Greening Effects of vegetation , urban density , building height , and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort, *Urban Forestry & Urban Greening*. Elsevier GmbH., 13(3), pp. 495–506. doi: 10.1016/j.ufug.2014.03.003.
- Pezzuto, C. C. (2007) *Avaliação do ambiente térmico nos espaços urbanos abertos. Estudo de caso em Campinas, SP*. Universidade Estadual de Campinas Faculdade.
- Sosa M. B., Correa Cantaloube E. and Cantón M. A. (2017). *Forma urbana y comportamiento térmico exterior. Un estudio para reducir la isla de calor urbana en una ciudad árida*. *Estudios del Hábitat* 15 (2): 1-12.
- Salvati, A., Monti, P., Coch, H., & Cecere, C. (2019) Climatic performance of urban textures: Analysis tools for a Mediterranean urban context, *Energy and Buildings*, 185, 162-179. doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.024
- Salvati, A., Palme, M., & Inostroza, L. (2017). Key Parameters for Urban Heat Island Assessment in A Mediterranean Context: A Sensitivity Analysis Using the Urban Weather Generator Model. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 245, 082055. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/8/082055>
- Santamouris, M. (2015) Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions, *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 512–513, pp. 582–598. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.01.060.
- Sola, A. et al. (2018) Simulation Tools to Build Urban-Scale Energy Models: A Review, *Energies*, 11(12), p. 3269. doi: 10.3390/en1123269.
- Yang, X. et al. (2013) Evaluation of a microclimate model for predicting the thermal behavior of different ground surfaces, *Building and Environment*. Elsevier Ltd, 60, pp. 93–104. doi: 10.1016/j.buildenv.2012.11.008.