

VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DE LA ISLA DE CALOR SUPERFICIAL EN TRES CIUDADES ARGENTINAS

Malena S. Lozada Montanari¹, Inés Camilloni¹

¹Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. — CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). — CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (UMI 3351 IFAECI). Buenos Aires, Argentina

(Manuscrito recibido el 24 de febrero 2021, en su versión final el 2 de septiembre de 2021)

RESUMEN

En este trabajo se analiza la evolución espacio-temporal de la Isla de Calor Urbana Superficial (ICU-S) derivada del contraste entre las temperaturas de superficie urbanas y rurales de Buenos Aires, Rosario y Córdoba, las tres ciudades más grandes de Argentina en términos de población. La información analizada corresponde a datos de 1 km x 1 km de resolución derivados de información satelital disponibles a través del *Global Surface UHI Explorer* para el período 2003-2017. En las tres ciudades se encuentra que, en promedio, la temperatura de la superficie urbana es superior a la rural (IUC-S positiva) durante la noche tanto en la media anual como en verano e invierno. El mayor contraste se registra en Buenos Aires donde alcanza el máximo de +2°C durante el verano y el mínimo en invierno (+1,5°C). En el caso de Rosario y Córdoba la diferencia en la magnitud entre el verano e invierno es de sólo 0,1°C. El área de cada ciudad que registra temperaturas de superficie superiores a la de las zonas rurales durante la noche representa en promedio el 93 % del total para Buenos Aires, 97 % para Rosario y 89 % para Córdoba. Durante el día, se encuentra que en algunos casos la intensidad es negativa generando el efecto de isla fría. Esto ocurre en invierno en las tres ciudades y en el promedio anual de Rosario y Córdoba. En Buenos Aires, donde reside más del 30 % de la población del país, existe una tendencia significativa al incremento en la magnitud media y máxima de la ICU-S diurna. La comparación entre la ICU-S y la ICU de canopia (derivada de datos de temperatura del aire) de Buenos Aires muestra valores positivos durante las horas de la noche en ambos casos, aunque de mayor magnitud en ICU-S en el promedio anual (+0,3°C) y durante el verano (+0,6°C) así como una tendencia hacia el incremento en la magnitud de ambos fenómenos durante las horas diurnas. *Palabras clave: Isla de Calor Urbana, Temperatura Superficial, Ciclo Anual, Tendencia*

SPATIO-TEMPORAL VARIABILITY OF THE SURFACE HEAT ISLAND IN THREE ARGENTINE CITIES

ABSTRACT

This paper investigates the spatiotemporal variations of the Surface Urban Heat Island (SUHI) computed as the difference of urban and rural land surface temperatures for the three major cities of Argentina: Buenos Aires, Rosario, and Cordoba. Satellite-based data of 1 km x 1 km resolution available through the Global Surface UHI Explorer were used to estimate mean and maximum values, trends and percentage of each urban area with positive/negative intensities of SUHI for the period 2003-2017. Results indicate that, on average the nocturnal urban surface temperature is higher than the rural one (positive SUHI) for the annual, winter and summer mean for the three cities. The greatest contrast corresponds to Buenos Aires, where the maximum SUHI magnitude is $+2^{\circ}\text{C}$ in summer and the minimum is $+1,5^{\circ}\text{C}$ in winter. Both Rosario and Cordoba exhibit a difference in magnitude between summer and winter of only $0,1^{\circ}\text{C}$. The percentage of the area of each city with nocturnal surface temperatures greater than the rural ones is on average, 93 % for Buenos Aires, 97 % for Rosario and 89 % for Cordoba. During daytime, in some cases the SUHI intensity is negative generating a cold island. This effect is observed in the three cities during the cold season and in Rosario and Cordoba for the annual mean. In Buenos Aires, that hosts more than 30 % of the total population of the country, there is a significant positive trend in the daytime mean and maximum SUHI intensity. The comparison between the Buenos Aires' SUHI and canopy UHI (derived from standard air temperature measurements) shows positive intensities during night-time in both cases, although the mean annual and summer SUHI are warmer than the UHI in $+0,3^{\circ}\text{C}$ and $+0,6^{\circ}\text{C}$, respectively. Additionally, there is a trend towards warmer daytime intensities of both types of heat islands.

Keywords: Urban Heat Island, Surface Temperature, Annual Cycle, Trend

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de urbanización e industrialización modifican las características de la superficie terrestre y de la atmósfera local mediante la transformación de sus propiedades radiativas, térmicas y aerodinámicas dando como resultados ambientes urbanos más cálidos que su entorno que originan la denominada isla de calor urbana (ICU) (e.g. Oke 1982; Kalnay y Cai, 2003; Souch y Grimmond, 2006; Zhao y otros, 2014, Oke y otros, 2017). Este fenómeno, que hace referencia al calentamiento diferencial que se registra en áreas urbanas en comparación con las zonas rurales próximas a la ciudad, fue identificado por primera vez en Londres (Howard, 1833) y constituye la manifestación atmosférica más reconocida del impacto de la urbanización sobre el clima de una ciudad.

La ICU se desarrolla en asentamientos humanos

de diverso tamaño y forma y en distintas regiones climáticas contribuyendo con un conjunto de cambios que impactan en el clima local y regional (Camilloni y Barros, 1997, Roth, 2013; Gu y Li, 2018), el crecimiento de la vegetación (Zhao y otros, 2016, Zhou y otros, 2016) y la calidad del aire (Li y otros, 2018, Li y otros, 2020). Entre los sectores que sufren consecuencias por el exceso de calor urbano se encuentran la salud y el bienestar humanos a través del aumento de la morbilidad y la mortalidad (Heaviside y otros, 2017) y el de la energía por el incremento del consumo para refrigeración (Santamouris y otros, 2015). Las zonas urbanas albergan el 55 % de la población mundial (UN, 2018) y se espera que en un mundo con una marcada aceleración en el crecimiento urbano (Chen y otros, 2020) y en el contexto del calentamiento global, el efecto de la ICU y sus consecuencias asociadas incrementen su severidad (Sachindra y otros, 2015, Manoli y

otros, 2019).

Se distinguen dos tipos básicos de ICU: atmosférica y superficial (Arnfield, 2003; Roth, 2013; Azevedo, 2016, Oke y otros, 2017). El primero de ellos hace referencia al aumento de temperatura medido en el aire urbano cerca de la superficie o en los primeros niveles de la atmósfera dentro de la capa límite en comparación con su entorno suburbano/rural. En consecuencia, dentro de esta categoría se definen dos subtipos: la ICU de canopia y la ICU de capa límite. Por otro lado, la ICU superficial corresponde a estimaciones de la temperatura de la superficie (ICU-S) (Takebayashi y Moriyama, 2007; Xu., 2009; Schwarz y otros, 2011; Peng y otros, 2012; Deng y Wu, 2013; Du y otros, 2016, Haashemi y otros, 2016). Entre las causas principales de las ICU se encuentran el almacenamiento de calor en las ciudades durante el día asociado a las propiedades térmicas y caloríficas de los materiales de construcción utilizados y su posterior liberación durante la noche, las emisiones de calor antropogénico y al limitado enfriamiento por evapotranspiración debido a los escasos espacios verdes (Oke, 1982). La intensidad de la ICU presenta variaciones diarias que están relacionadas principalmente con la evolución de los distintos términos de la ecuación de balance de energía durante las horas del día y la noche, y con modificaciones en la situación sinóptica regional. En general, la intensidad máxima se alcanza algunas horas después de la puesta del sol, debido al rápido enfriamiento rural. Más avanzada la noche, el enfriamiento urbano es importante y por lo tanto el desarrollo de la ICU es más lento. Luego del amanecer, el calentamiento rural es más acelerado que el urbano debido a que sus superficies tienen menores capacidades térmicas y mayor exposición a la radiación solar. De esta forma, es frecuente que durante algunas horas del día se desarrolle una "isla fría" (Arnfield, 2003).

Mientras que la estimación de la magnitud de la ICU de canopia usualmente se realiza a partir del contraste entre temperaturas del aire

medidas en una estación meteorológica urbana y en una rural y la de capa límite a partir de mediciones de temperatura en diferentes alturas de la atmósfera por medio de instrumental montado en torres micrometeorológicas, la magnitud de la ICU-S es calculada como la diferencia entre la temperatura de la superficie terrestre del área urbana y la de su área no urbana circundante derivada generalmente de información satelital. Si bien las intensidades de ambos tipos de ICU son similares en la escala anual, pueden tener diferentes variabilidades diurnas y estacionales (Cui y De Foy, 2012; Chakraborty y otros, 2016) ya que los procesos advectivos tienen un rol importante en la ICU de canopia (Zhou y otros, 2019). En los últimos años, en atención a la disponibilidad de información satelital y en respuesta a las ventajas que ofrecen estos datos en términos de la posibilidad de realizar una evaluación espacial detallada del calentamiento de las superficies urbanas, la cantidad de trabajos que evalúan la intensidad de la ICU-S en diferentes ciudades del mundo se incrementó significativamente (e.g. Peng y otros, 2012; Yao y otros, 2021).

El análisis del exceso de calor en ciudades argentinas es un tema de creciente interés dado que más del 90% de la población del país vive en áreas urbanas (INDEC, 2012). Por ejemplo, se han realizado diversos estudios para caracterizar diferentes aspectos del clima urbano de Buenos Aires (Camilloni y Mazzeo, 1987; Rusticucci y Vargas, 1991; Barros y Camilloni, 1994; Camilloni y Barros, 1997; Figuerola y Mazzeo, 1998; Bejarán y Camilloni, 2003; Camilloni y Barrucand, 2012). En todos los casos, estos trabajos identifican los máximos contrastes de temperatura entre la ciudad y sus alrededores en horas nocturnas e indicios de una isla fría en las primeras horas de la tarde. Cúnsulo y otros (2011) analizaron la ICU en verano e invierno en el período 1995-2010 y su correlación con la ocupación del Área Urbana del Gran San Juan. Sus resultados muestran que la intensidad y extensión espacial de la ICU aumenta en relación con el incremento de la ocupación urbana. Diferentes aspectos de la ICU

de la ciudad de Mendoza fueron estudiados por ejemplo por Correa y otros (2006) y Puliafito y otros (2013). Sus resultados coinciden en señalar que es un fenómeno presente durante todo el año alcanzando valores máximos durante la noche que oscilan entre $+8^{\circ}\text{C}$ y $+10^{\circ}\text{C}$ (Correa y otros, 2006) y que el efecto de enfriamiento de un parque urbano se extiende entre 800 y 1000 m hacia su entorno, con una disminución de la temperatura promedio de 1.3°C durante el día y más de 4.0°C por la noche (Puliafito y otros, 2013). Maristany y otros (2008) estudiaron el contraste de temperatura máxima media urbana-rural de la ciudad de Córdoba a nivel decadal entre 1941 y 2000 encontrando un progresivo incremento en su magnitud de $+0,37^{\circ}\text{C}$ en la década 1941-1950 a $+1,05^{\circ}\text{C}$ en 1991-2000. Por otra parte, de la Casa y Nasello (2014) analizaron la variación de la temperatura del aire en la ciudad de Córdoba y de las estaciones rurales y suburbanas cercanas correspondientes a la red de observación del Servicio Meteorológico Nacional en el período 1960-2010 hallando que las temperaturas urbanas son entre $+1$ y $+2^{\circ}\text{C}$ superiores en el promedio anual sin variaciones temporales significativas en esta diferencia durante el período de estudio. Ferrelli y otros (2016) analizaron la evolución de la isla de calor de verano e invierno entre los años 1985 y 2014 en Bahía Blanca encontrando que el crecimiento de las edificaciones y el incremento de la población modificaron la distribución espacial de la temperatura y la humedad relativa produciendo situaciones de desconfort. Algunas características de la ICU de Rosario fueron estudiadas por Vega y otros (2019) derivadas de mediciones realizadas entre junio 2013 y junio 2014 observando diferencias en promedio de entre $+0,7^{\circ}\text{C}$ y $+1,2^{\circ}\text{C}$ entre el centro de la ciudad y sus bordes. Recientemente, Casadei y otros (2021) estudiaron 55 ciudades argentinas (excluyendo grandes aglomerados como Buenos Aires y Córdoba) con el objetivo de cuantificar las ICU-S del período 2011-2015. Con esta finalidad utilizaron información satelital MODIS encontrando que el promedio anual de la ICU-S diurna de las ciudades

analizadas fue $+0,36 \pm 1,99^{\circ}\text{C}$ y $+1,68 \pm 0,61^{\circ}\text{C}$ para la nocturna.

En este trabajo se analiza la evolución temporal y espacial de la ICU-S en el período 2003-2017 de los tres aglomerados más importantes en términos de población de Argentina: Buenos Aires ($34^{\circ}36'\text{S}$, $58^{\circ}22'\text{O}$, 25 m snm), Rosario ($32^{\circ}56'\text{S}$, $60^{\circ}38'\text{O}$, 25 m snm) y Córdoba ($31^{\circ}24'\text{S}$, $64^{\circ}10'\text{O}$, 425 m snm) (Figura 1). En particular, se analizan en cada caso los valores medios y extremos, así como la evolución de la proporción del territorio urbano que presentan valores positivos y negativos. Finalmente, en el caso particular de Buenos Aires, se realiza una comparación entre la magnitud y la evolución temporal de la ICU-S y la ICU de canopia.

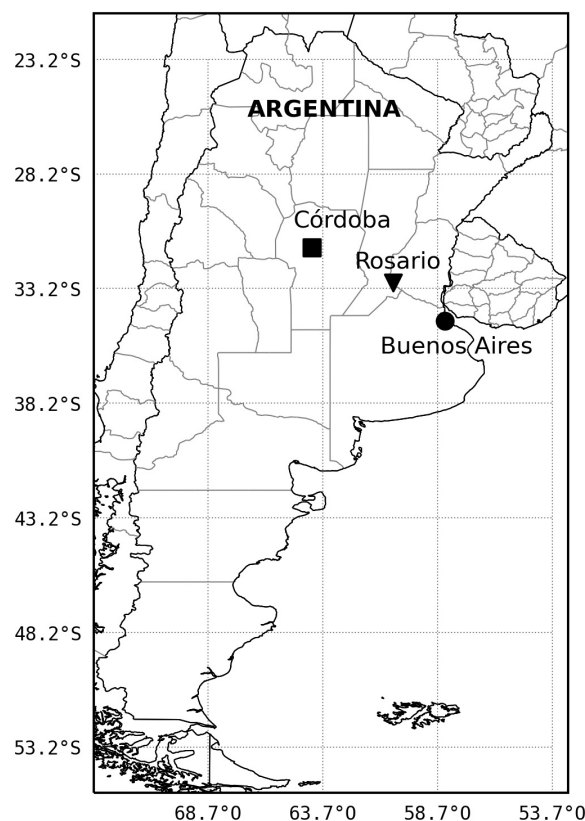


Figura 1: Localización de las tres ciudades argentinas consideradas en este estudio.

2. DATOS Y METODOLOGIAS

2.1. Área de Estudio

Aglomerado urbano	Población	Porcentaje respecto de la población total de Argentina	Área (km ²)
Córdoba	1.438.000	3,3	576
Rosario	1.447.000	3,3	589
Buenos Aires	13.960.000	31,7	3900

Tabla I: Población estimada, porcentaje respecto de la población total para el año 2017 y superficie de los tres aglomerados urbanos más importantes de Argentina. Fuente: INDEC (2021).

El Área Metropolitana de Buenos Aires (conformada por la ciudad y 24 partidos, de aquí en más referida como Buenos Aires), Rosario y Córdoba son los tres aglomerados con mayor número de habitantes que en conjunto representan el 38.3% de la población del país (Tabla I). En la Figura 2 se presentan las imágenes satelitales de cada uno de estos aglomerados donde es posible apreciar la extensión de la mancha urbana para cada caso. Asimismo, en la tabla I se muestra el área y la población estimada para cada una para el año 2017 (INDEC, 2021).

2.2. Datos y metodología de análisis de la ICU-S de Buenos Aires, Córdoba y Rosario

Para el análisis de la ICU-S de las ciudades seleccionadas se utilizó la información generada a través del algoritmo *simplified-urban-extent* (SUE) desarrollado por Chakraborty y Lee (2019). Este algoritmo permitió calcular la intensidad de la ICU-S a través de imágenes MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) de aproximadamente 9500 clusters urbanos alrededor del mundo para el período 2003-2017. La información resultante se encuentra disponible a través del *sistema Global Surface UHI Explorer* desarrollado por la Universidad de Yale (<https://yceo.yale.edu/research/global-surface-uhi-explorer>). En la metodología propuesta por Chakraborty y Lee (2019), se consideraron datos de temperatura de superficie derivados del MODIS TERRA (MOD11A2) y AQUA (MYD1A2),

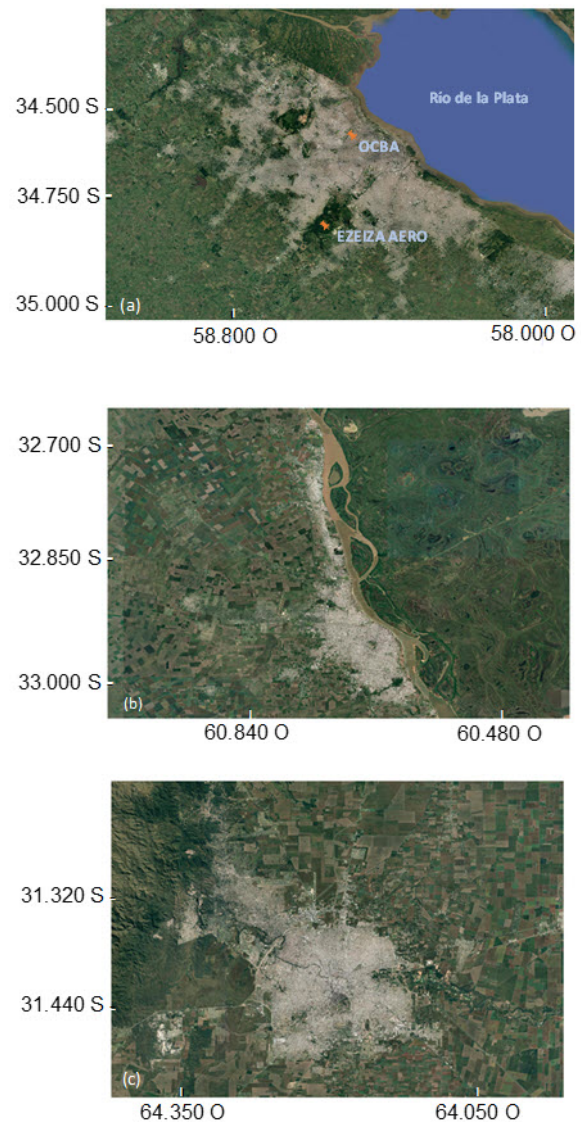


Figura 2: Imágenes satelitales de los aglomerados urbanos Buenos Aires (a), Rosario (b) y Córdoba (c). En Buenos Aires se muestra además la ubicación de las estaciones meteorológicas OCBA y Ezeiza Aero.

disponibles para una resolución espacial de 1 km x 1 km. Para el análisis sólo se utilizaron píxeles de cielo claro con un error promedio de temperatura de superficie menor a 3 K. Se distinguieron además dos subconjuntos de datos de acuerdo con el uso del suelo (urbano y no-urbano) y se removieron los píxeles correspondientes a agua ya que debido a su

gran capacidad calorífica podrían conducir a una sobreestimación de la intensidad de la ICU-S en el día y una subestimación durante la noche. La magnitud de la ICU-S fue estimada en cada píxel como la diferencia entre la temperatura de superficie correspondiente y la temperatura no urbana. El valor diurno se calculó a partir de la media de las estimaciones para las horas 10:30 y 13:30 y el nocturno a partir del promedio de las 01:30 y 22:30 horas.

En este trabajo, para cada ciudad y mes del período 2003-2017, la información del *Global Surface UHI Explorer* fue procesada por medio del Sistema de Información Geográfica *QGis* que es un software libre y de código abierto ampliamente difundido. Haciendo uso de este sistema se estimó además, para cada año, la proporción de área urbana con intensidades de ICU-S positivas y negativas y las intensidades máximas tanto a nivel diurno como nocturno definidas como el máximo contraste urbano/rural medido en un píxel del aglomerado.

2.3. Datos y metodología de análisis de la ICU de Buenos Aires

Para la segunda parte del análisis, en el que se comparó la ICU-S derivada de las imágenes satelitales con la ICU de canopia de Buenos Aires, se analizaron datos de temperatura horaria del período 2003-2017 de dos estaciones meteorológicas pertenecientes a la red de observación del Servicio Meteorológico Nacional: Observatorio Central de Buenos Aires (OCBA) y Ezeiza Aero (Figura 2a). Estas estaciones son representativas del área urbana y rural respectivamente y distan entre sí aproximadamente 30 km. La estimación de la magnitud de la ICU de canopia se realizó a través de la diferencia entre la temperatura registrada en la estación urbana (OCBA) y la registrada en la estación rural (Ezeiza Aero) para cada hora.

3. RESULTADOS

3.1. ICU-S de Buenos Aires

La ICU-S media anual diurna (Figura 3) presenta durante los años analizados valores negativos indicando la presencia de una isla fría que cubre una extensión minoritaria de la ciudad que representa entre el 14 % (año 2014) y el 40 % (año 2009) del total de los píxeles urbanos. La única excepción es el año 2008 en el que ocupa un área más extensa (65 % de la superficie). Asimismo, se encuentra que la proporción de territorio del aglomerado Buenos Aires con isla fría (cálida) diurna muestra una tendencia a la reducción (expansión) a razón de 7 % por década. La intensidad máxima de la ICU-S diurna varía entre $+1,6^{\circ}\text{C}$ (año 2009) y $+3,1^{\circ}\text{C}$ (año 2017) mientras que la isla fría es máxima en el año 2008 con una magnitud de $-4,4^{\circ}\text{C}$.

La ICU-S media anual nocturna (Figura 4) es positiva en más del 90 % del territorio urbano en todo el período analizado y tiene una magnitud media de $+1,7^{\circ}\text{C}$. Los valores máximos oscilan entre $+3,7^{\circ}\text{C}$ (años 2004 y 2012) y $+4,3^{\circ}\text{C}$ (año 2013). Estos resultados son consistentes con los obtenidos por Sobrino e Irakulis (2020) que encuentran para la ICU-S nocturna de Buenos Aires una magnitud media de $1,87^{\circ}\text{C}$ a partir del análisis de imágenes provistas por el satélite Sentinel 3A correspondientes al período junio 2018-mayo 2019. Sin embargo, la intensidad máxima de la ICU-S nocturna estimada por Sobrino y otros, (2020) es $6,36^{\circ}\text{C}$, aproximadamente 2°C por encima de la obtenida en este trabajo. Esta diferencia podría ser el resultado de los diferentes períodos de análisis y datos considerados. En un análisis estacional de la ICU-S nocturna para los trimestres de verano (diciembre, enero y febrero) e invierno (junio, julio y agosto) (figuras no mostradas), se observa que en el verano la ICU-S es positiva en casi todo el territorio alcanzando valores máximos que superan $+4^{\circ}\text{C}$ en casi la mitad de la superficie urbana en la mayor parte de los años. Durante el invierno

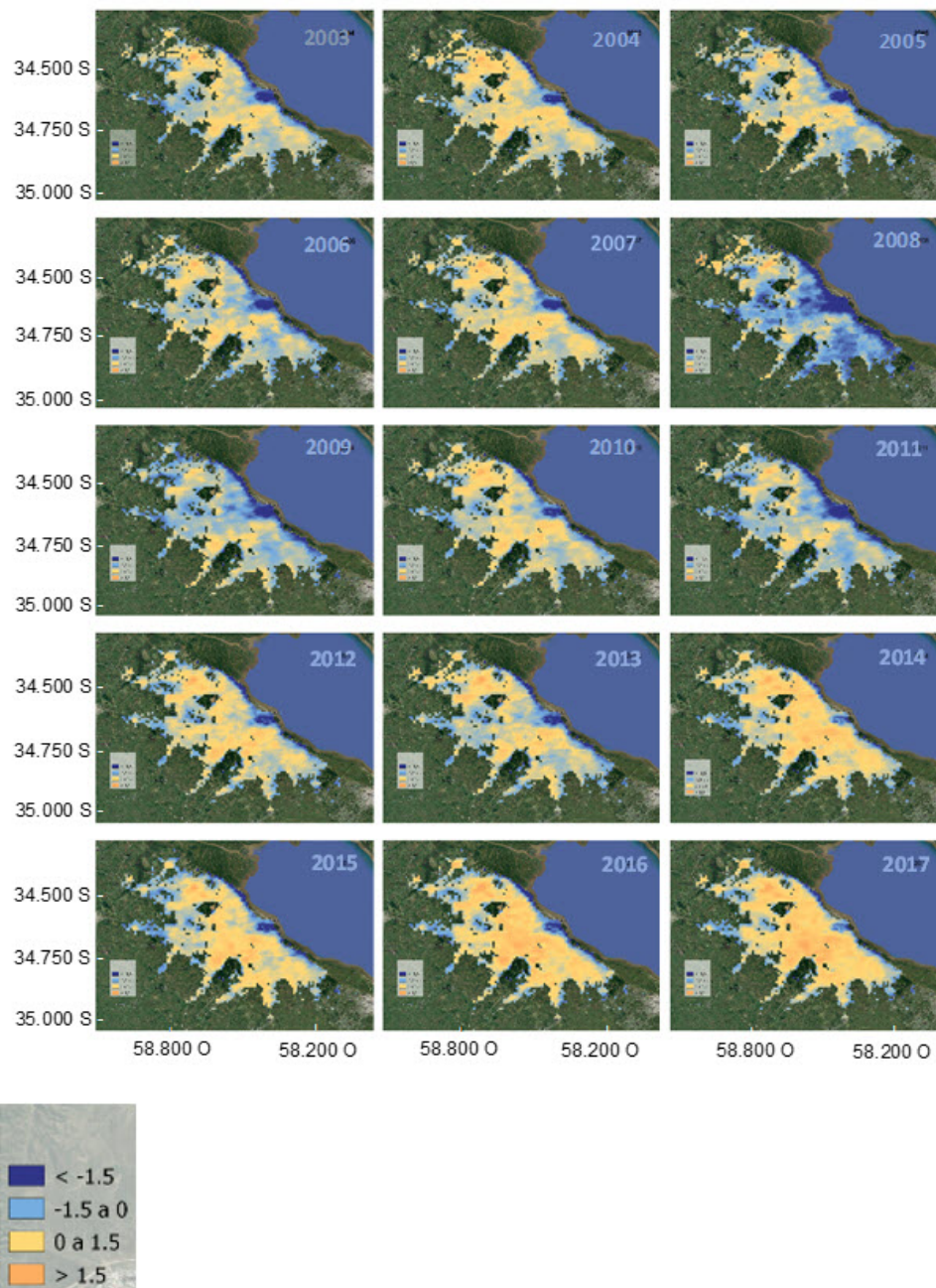


Figura 3: Evolución anual de la intensidad de la ICU-S diaria ($^{\circ}$ C) del Área Metropolitana de Buenos Aires en el período 2003-2017.

se observan también valores positivos pero cuya intensidad es menor a la de verano ya que en promedio está entre $+1^{\circ}$ C y $+2^{\circ}$ C. En esta estación los valores máximos cercanos a $+4^{\circ}$ C quedan restringidos a una porción minoritaria de la superficie. Asimismo, no se identifica una variabilidad interanual significativa en ninguna de las dos estaciones.

3.2. ICU-S de Rosario

A diferencia de lo que sucede en Buenos Aires, la ICU-S media anual diaria de la ciudad de Rosario (Figura 5) es negativa durante todo el período en más de la mitad de la superficie alcanzando la máxima extensión en el año 2008 (88%). La intensidad máxima varía

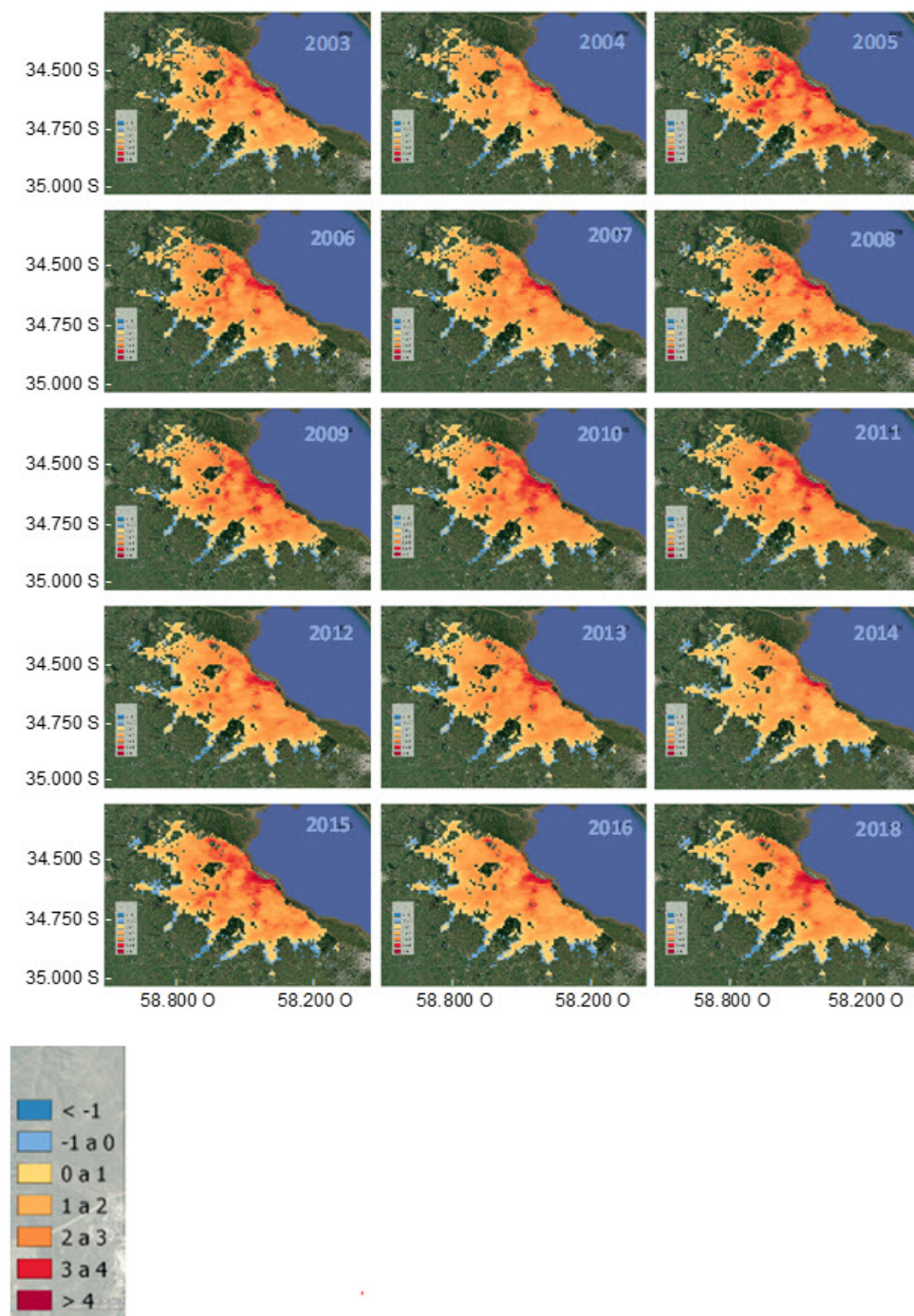


Figura 4: Evolución anual de la intensidad de la ICU-S nocturna (°C) de Buenos Aires en el período 2003-2017.

entre $+0,8^{\circ}\text{C}$ (año 2013) y $+1,5^{\circ}\text{C}$ (año 2005) mientras que la isla fría más intensa registrada está entre $-3,7^{\circ}\text{C}$ (año 2017) y $-7,3^{\circ}\text{C}$ (año 2008). La ICU-S nocturna (Figura 6) es positiva en más del 96% del área durante todo el período

con valores mayoritariamente en el rango entre $+1^{\circ}\text{C}$ y $+3^{\circ}\text{C}$ y un máximo de $+3,6^{\circ}\text{C}$ (año 2015). Casadei y otros (2021) identifican para la ciudad de Rosario resultados comparables a partir del análisis de datos del sensor MODIS

del período 2011-2015 encontrando una isla fría en el promedio anual correspondiente a las horas diurnas cuyo valor es de aproximadamente $-3,0^{\circ}\text{C}$ y una ICU-S nocturna del orden de $+1,2^{\circ}\text{C}$.

El análisis de la ICU-S nocturna de los trimestres de verano e invierno (figuras no mostradas), muestra durante el verano valores positivos cuya magnitud máxima supera $+4^{\circ}\text{C}$ con una distribución espacial y magnitud semejante a la media anual. En el trimestre de invierno, la intensidad máxima es de $+4^{\circ}\text{C}$.

3.3. ICU-S de Córdoba

La intensidad de la ICU-S media anual diurna de la ciudad de Córdoba (Figura 7) es mayormente negativa en el período 2003-2013 cubriendo entre el 55 % y 78 % del área urbana. A partir del año 2014 la superficie con el efecto de isla fría se reduce a una proporción que oscila entre 26 % (año 2016) y 44 % (año 2014) de la ciudad. La magnitud más extrema de este fenómeno es $-4,4^{\circ}\text{C}$ en el año 2014 mientras que la máxima ICU-S diurna es de $+2,2^{\circ}\text{C}$ y se registra en 2013. En el caso nocturno (Figura 8) la ICU-S es positiva en más del 86 % del área urbana siendo los valores más frecuentes los que se encuentran en el rango entre $+1^{\circ}\text{C}$ y $+2^{\circ}\text{C}$ y alcanzando un máximo de $+3,5^{\circ}\text{C}$ también en el año 2013. El análisis estacional (figuras no mostradas) indica que, durante el período nocturno de verano, la ICU-S alcanza valores mayores que en el promedio anual acompañados de una marcada variabilidad interanual.

3.4. Comparación entre las ICU-S de los aglomerados Buenos Aires, Rosario y Córdoba

Con la finalidad de realizar una comparación entre las ICU-S de las tres ciudades analizadas se considera como valor representativo de su magnitud a nivel mensual y anual al promedio de las intensidades de los píxeles urbanos en cada aglomerado. La ICU-S media anual diurna del período 2003-2017 es positiva en la ciudad de

ICU-S DIURNA ($^{\circ}\text{C}$)			
	Buenos Aires	Rosario	Córdoba
Anual	+0,4	-0,8	-0,2
Verano	+1,2	+0,7	+0,8
Invierno	-0,4	-1,6	-1,2
ICU-S NOCTURNA ($^{\circ}\text{C}$)			
Anual	+1,7	+1,4	+1,5
Verano	+2,0	+1,4	+1,6
Invierno	+1,5	+1,5	+1,5

Tabla II: Intensidad media ($^{\circ}\text{C}$) de la ICU-S diurna y nocturna a nivel anual y para verano e invierno para cada aglomerado urbano.

Buenos Aires y negativa en Rosario y Córdoba (Tabla II). Estos resultados son consistentes con los obtenidos por Casadei y otros (2021) en el estudio de la ICU-S media del período 2011-2015 de 55 ciudades argentinas de diverso tamaño donde detectan una isla fría en la ciudad de Rosario y aglomerados urbanos de la provincia de Córdoba (no evalúan específicamente la ciudad de Córdoba) y con intensidad positiva en la ciudad de La Plata, el aglomerado más próximo a Buenos Aires analizado en su trabajo. En el verano, las tres ciudades tienen ICU-S diurnas con intensidad positiva que es máxima en Buenos Aires ($+1,2^{\circ}\text{C}$) mientras que en el invierno todas presentan el efecto de isla fría. Este comportamiento diferencial en términos de la presencia de ICU-S cálidas en verano y frías en invierno en las tres ciudades analizadas, que es evidente en el ciclo anual (Figura 9), podrían estar asociadas a ciertas propiedades de los materiales urbanos en términos de reflectancia de la radiación solar y conductividad térmica y a la geometría de las ciudades que al generar más sombra durante los meses de invierno disminuyen la insolación directa sobre la superficie (Kato y otros, 2010; Nassar y otros, 2017).

Respecto a la intensidad nocturna, se encuentra que es siempre positiva y supera a la diurna en todos los casos en los que presentan igual signo (Tabla II). Asimismo, se identifica poca variabilidad entre verano e invierno con un ciclo anual de escasa amplitud (Figura 9). La ICU-S

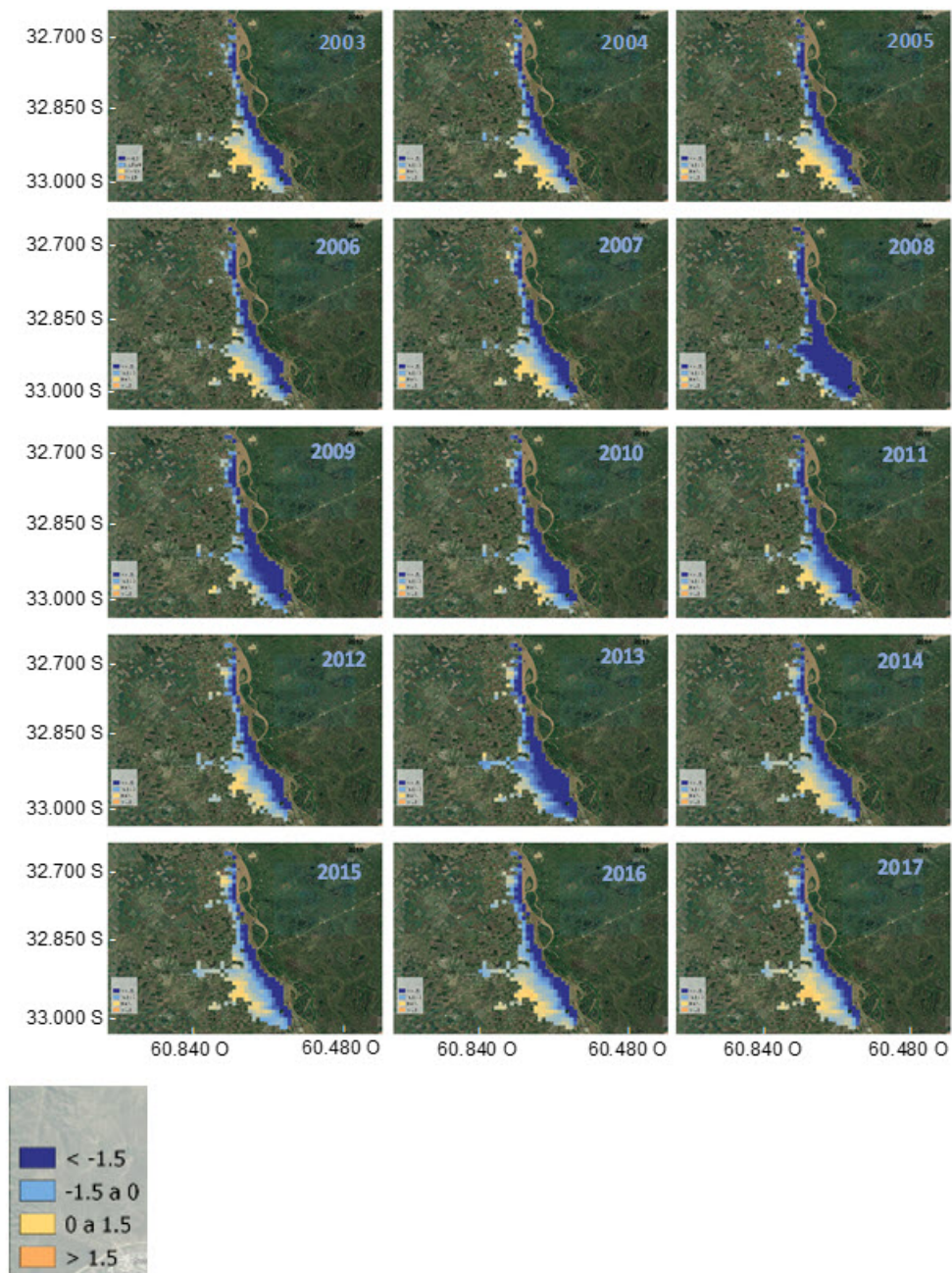


Figura 5: Evolución anual de la intensidad de la ICU-S diurna ($^{\circ}\text{C}$) de Rosario en el período 2003-2017.

nocturna más intensa se registra en Buenos Aires durante el verano ($+2^{\circ}\text{C}$). Casadei y otros (2021) encuentran también intensidades positivas durante la noche en todas las ciudades analizadas con escasas diferencias estacionales. Este exceso de calentamiento urbano es consecuencia de la modificación del balance de

energía como resultado entre otros factores del aumento del calor sensible almacenado por los materiales utilizados en las construcciones, de la disminución de la evapotranspiración y de la reducción del transporte turbulento de calor y del (Oke, 1982).

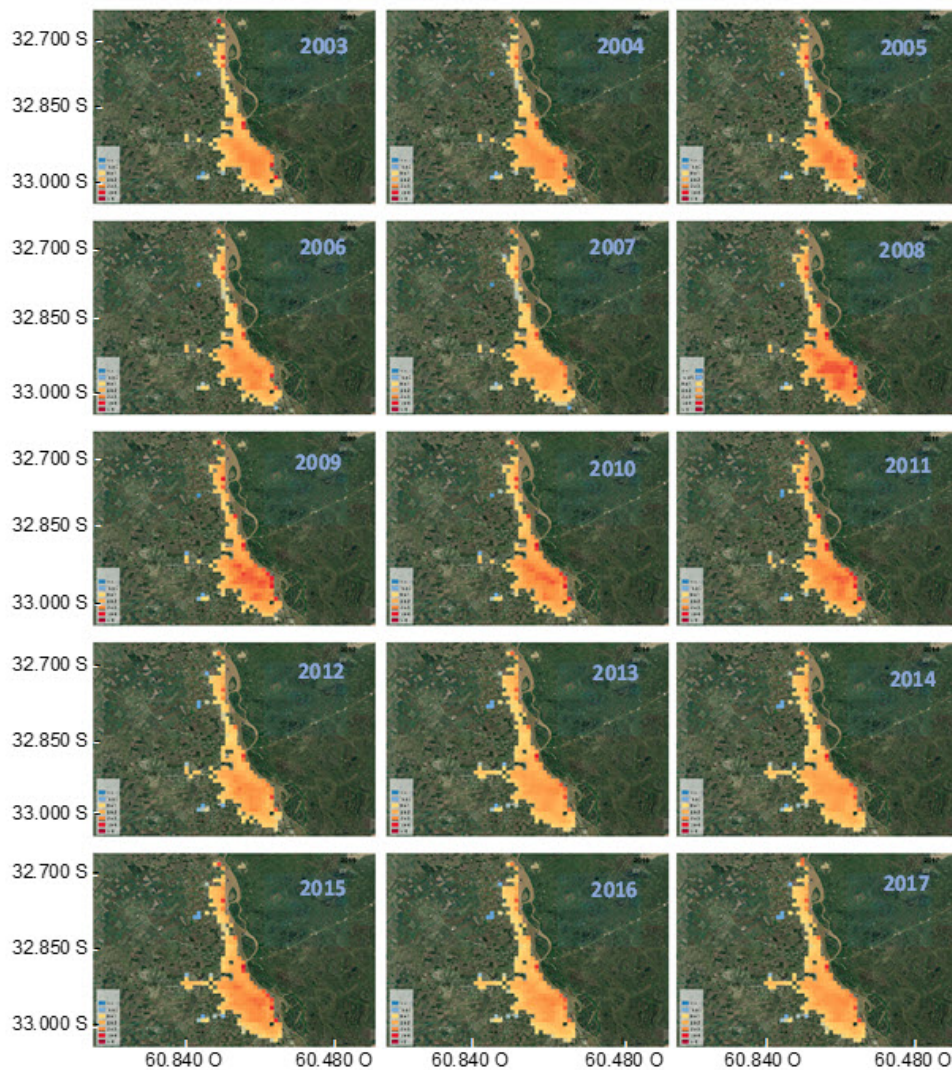


Figura 6: Evolución anual de la intensidad de la ICU-S nocturna ($^{\circ}\text{C}$) de Rosario en el período 2003-2017.

Wu y otros (2019) utilizan datos MODIS para el período 2003-2016 para analizar la ICU-S en un conjunto de ciudades de América del Sur entre las que se encuentran Buenos Aires, Córdoba y Rosario. Sus resultados muestran en coincidencia con este estudio, que durante la noche la ICU-S media es cálida en las tres ciudades en el promedio anual y estacional, mientras que la ICU-S diurna media anual de Buenos Aires es cálida y en Córdoba se observa una isla fría. La única discrepancia es en Rosario donde obtienen que en el promedio anual la temperatura urbana diurna es superior a la rural (ICU-S positiva).

La evolución temporal de la ICU-S diurna media anual muestra que sólo en la ciudad de Buenos Aires se registran valores positivos durante el período 2003-2017 (con excepción del año 2008) mientras que el efecto de isla fría es dominante en la mayor parte de los promedios anuales de Córdoba y está siempre presente y con máxima intensidad en Rosario (Figura 10). Asimismo, las intensidades máximas registradas en cada año en un píxel urbano son siempre positivas y toman los valores más altos en Buenos Aires y los mínimos en Rosario siguiendo el mismo patrón que la intensidad media (Figura 10). El análisis de las tendencias correspondientes a

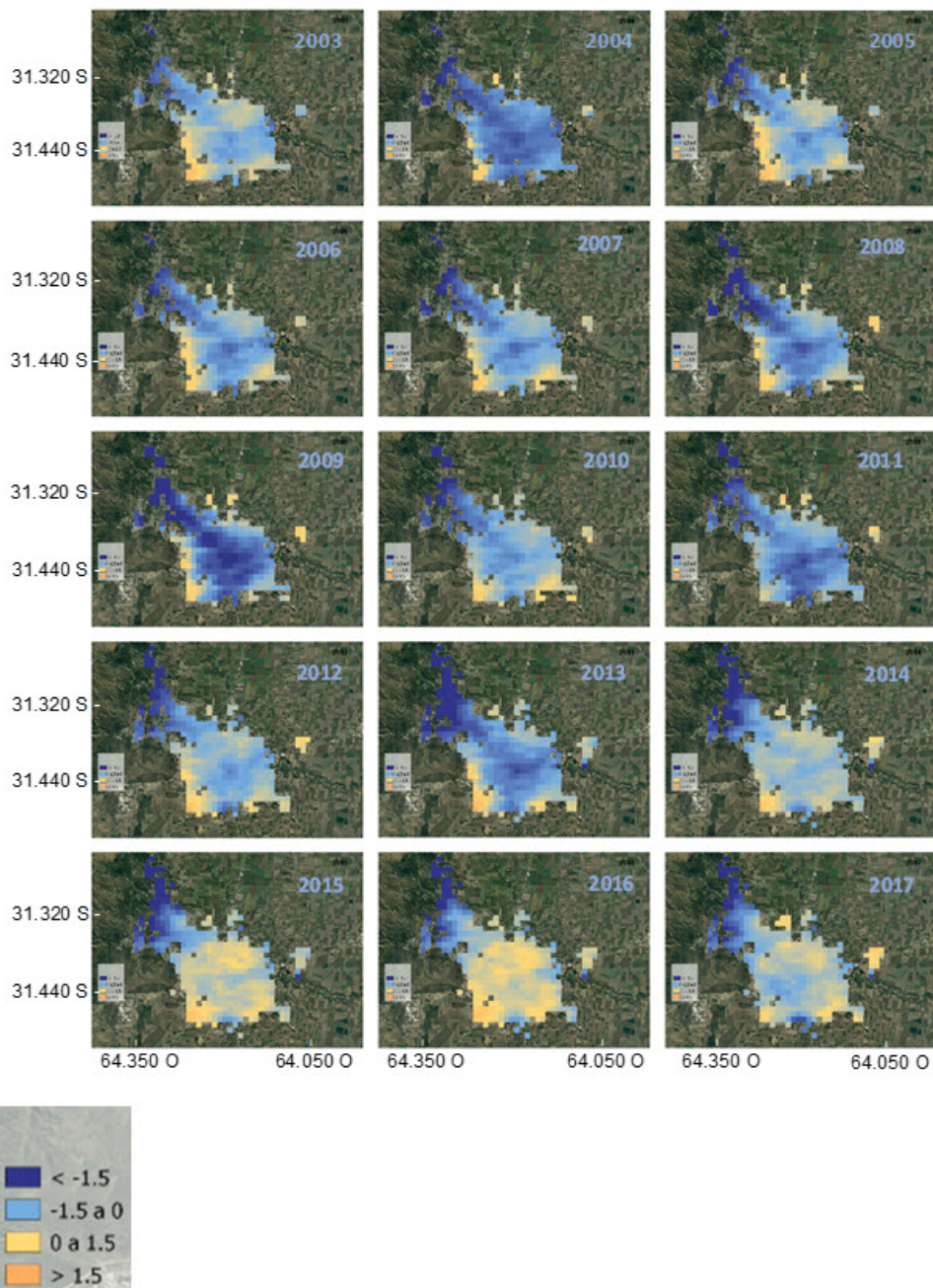


Figura 7: Evolución anual de la intensidad de la ICU-S diurna ($^{\circ}\text{C}$) de Córdoba en el período 2003-2017.

estas series temporales muestra valores positivos en todos los casos (con excepción de la ICU-S máxima de Rosario) aunque son significativas estadísticamente solo en Buenos Aires (Tabla III). Estos resultados que indican una tendencia a ICU-S diurnas más cálidas en las tres ciudades argentinas analizadas son consistentes con los

obtenidos en otros aglomerados en diferentes regiones del mundo y que fueron asociados al crecimiento de la infraestructura urbana así como a otros indicadores como el incremento de la población y del consumo de electricidad per capita (Benas y otros, 2017). La relación entre población urbana derivada de estimaciones

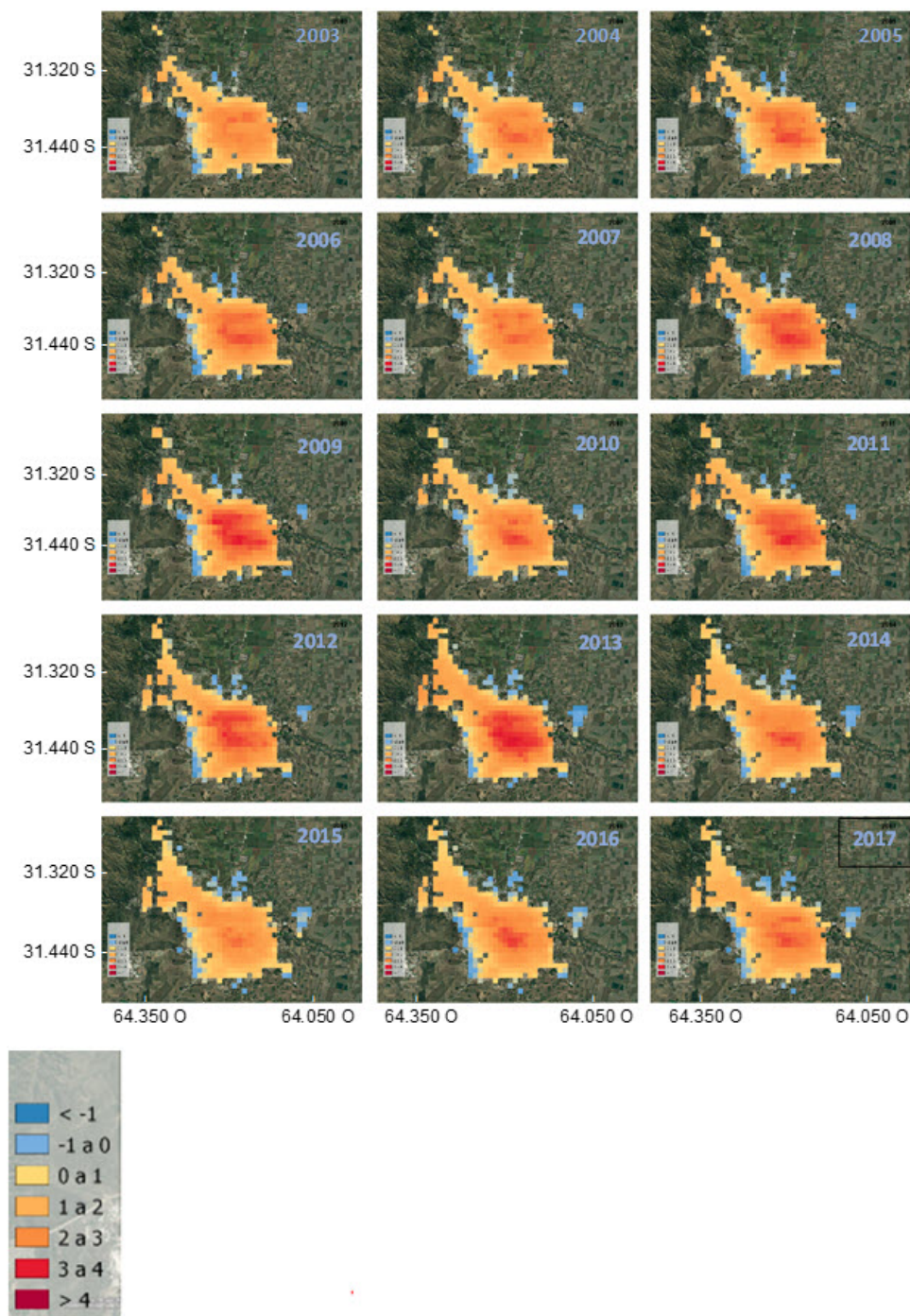


Figura 8: Evolución anual de la intensidad de la ICU-S nocturna (°C) de Córdoba en el período 2003-2017.

intercensales (INDEC, 2021) y la intensidad de la ICU-S media y máxima anual diurna de cada aglomerado se presenta en la Figura 11. Se encuentra que sólo para Buenos Aires el crecimiento de la población urbana podría

estas asociado a las tendencias significativas observadas en las IUC-S media y máxima al explicar el 40% y 35% de la varianza respectivamente. Como es esperable, en Rosario y Córdoba, donde las tendencias de las IUC-S

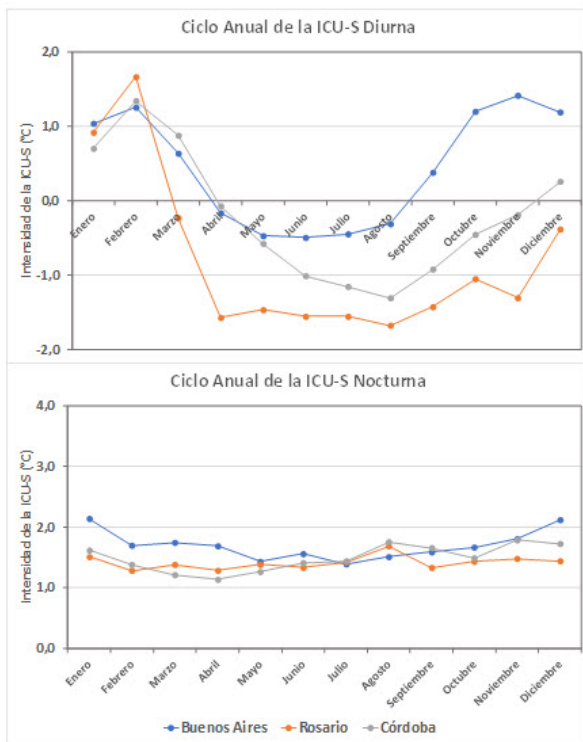


Figura 9: Ciclo anual de la intensidad de la ICU-S diurna (arriba) y nocturna (abajo) (°C) de las ciudades de Buenos Aires, Rosario y Córdoba.

Tendencia de la ICU-S media (°C/década)			
	Buenos Aires	Rosario	Córdoba
Diurna	+0,38*	+0,14	+0,19
Nocturna	-0,10	-0,08	-0,06
Tendencia de la ICU-S máxima (°C/década)			
Diurna	+0,51*	-0,10	+0,17
Nocturna	+0,08	+0,11	+0,17

Tabla III: Tendencia (°C/década) de la ICU-S media y máxima diurna y nocturna para cada uno de los aglomerados (* indica significancia estadística al 95 %).

diurnas a nivel anual no son significativas, no se encuentra relación con el crecimiento de la población urbana.

La ICU-S nocturna media anual es siempre positiva con escasas diferencias en magnitud entre las tres ciudades y muestra además una variabilidad interanual inferior a la diurna. Las intensidades máximas son marcadamente

superiores en Buenos Aires con valores superiores a +3,7°C durante todos los años mientras que en Rosario y Córdoba son semejantes y se ubican en el rango +2,6°C a +3,6°C (Figura 10). Las tendencias de las ICU-S nocturnas media y máxima en ninguno de los casos presentan significancia estadística (Tabla III).

3.5. Comparación entre la isla de calor de superficie (ICU-S) y la isla de calor de canopia (ICU) de Buenos Aires

En esta sección se realiza una comparación en términos de magnitud media y evolución temporal de las islas de calor superficial (IUC-S) y de canopia (ICU) de la ciudad de Buenos Aires para el período 2003-2017. Los resultados obtenidos muestran que el fenómeno de isla de calor es predominantemente nocturno en este aglomerado ya que es evidente en el promedio anual, así como en verano e invierno para ambos tipos de islas (Tabla IV). Sin embargo, la intensidad de la ICU-S durante las horas de la noche supera a la de la ICU en 0,3°C y 0,6°C a nivel anual y durante el verano respectivamente mientras que en el invierno es igual (Tabla IV). Los mayores contrastes se encuentran durante las horas del día donde en el promedio anual, la ICU-S es cálida mientras que en la ICU se identifica una isla fría. A nivel estacional los comportamientos son opuestos: en verano ambas son cálidas con ICU-S superando a ICU y en invierno son frías en los dos casos, aunque en forma mucho más marcada en la ICU (Tabla IV). Las características de ambos tipos de isla de calor durante el verano se explican a partir de las propiedades de los materiales urbanos (hormigón, asfalto, cemento) que debido a su bajo albedo absorben la radiación de onda corta en las horas del día conduciendo a altas temperaturas superficiales que dan como resultado ICU-S con intensidades de +1,2°C en el promedio diurno y +2,0°C en el nocturno. Asimismo, la acumulación y posterior liberación de calor desde las superficies urbanas, así como la incorporación de aire cálido resultante de acciones como la refrigeración de espacios

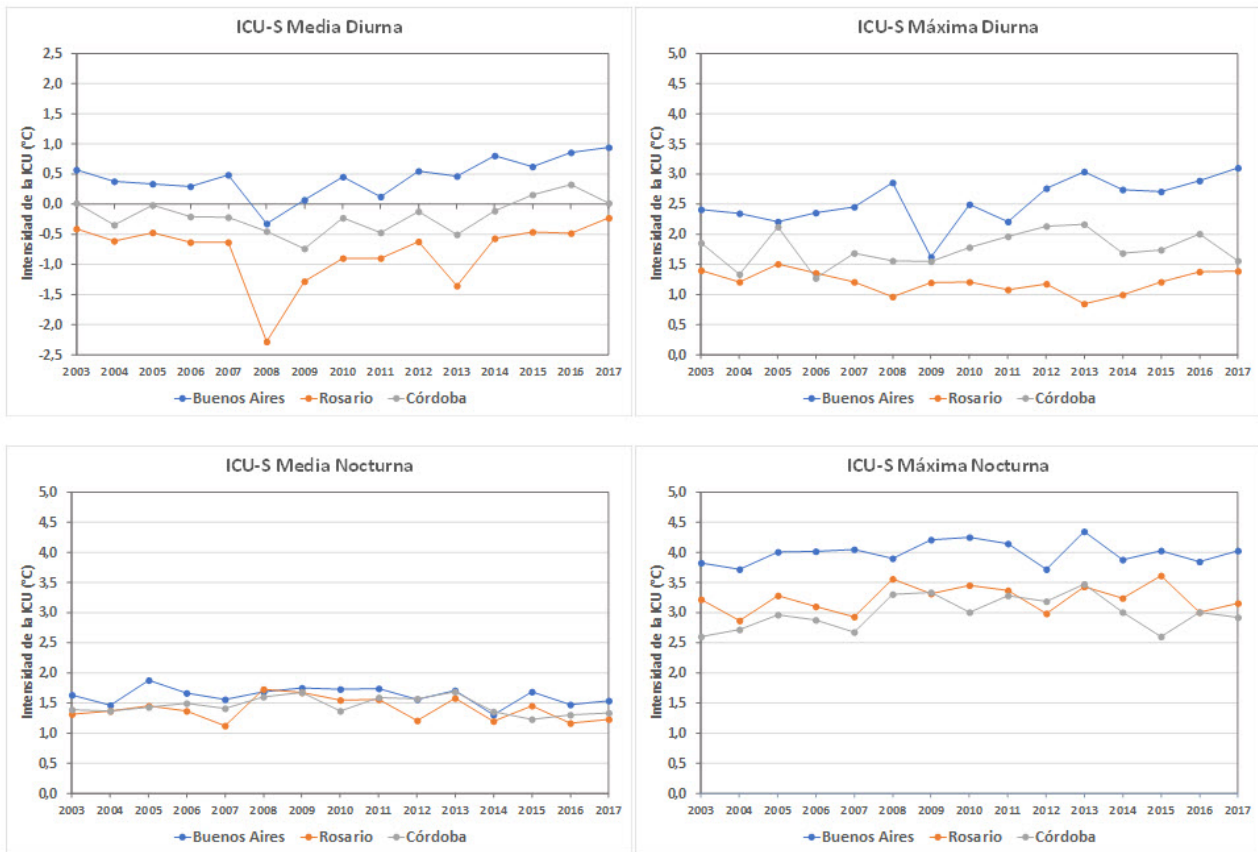


Figura 10: Evolución de la intensidad de la ICU-S media (izquierda) y máxima (derecha) anual diurna y nocturna (°C) de Buenos Aires, Rosario y Córdoba para el período 2003-2017.

Intensidad de la isla de calor DIURNA (°C)		
	ICU-S	ICU
Anual	+0,4	-0,8
Verano	+1,2	+0,7
Invierno	-0,4	-1,6
Intensidad de la isla de calor NOCTURNA (°C)		
Anual	+1,7	+1,4
Verano	+2,0	+1,4
Invierno	+1,5	+1,5

Tabla IV: Intensidad media (°C) de las ICU-S e ICU diurna y nocturna a nivel anual y para verano e invierno para Buenos Aires.

Tendencia (°C/década)		
	ICU-S	ICU
Diurna	+0,38*	-0,14
Nocturna	-0,10	-0,40*

Tabla V: Tendencias (°C/década) de la ICU-S e ICU media nocturna y diurna para Buenos Aires (* indica significancia estadística al 95%)

interiores dan como resultado en promedio ICU estivales cálidas en el día y la noche (Arnfield, 2003; Phelan y otros, 2015). La

evolución temporal de la magnitud anual de la isla de calor de Buenos Aires muestra una tendencia positiva en la ICU-S diurna y una tendencia negativa en ICU nocturna (Tabla V). Como se indicó en la sección anterior, el crecimiento de la intensidad de ICU-S diurna podría asociarse al aumento de la infraestructura urbana y a otros indicadores de desarrollo como el consumo de energía per cápita que en Argentina aumentó 24%

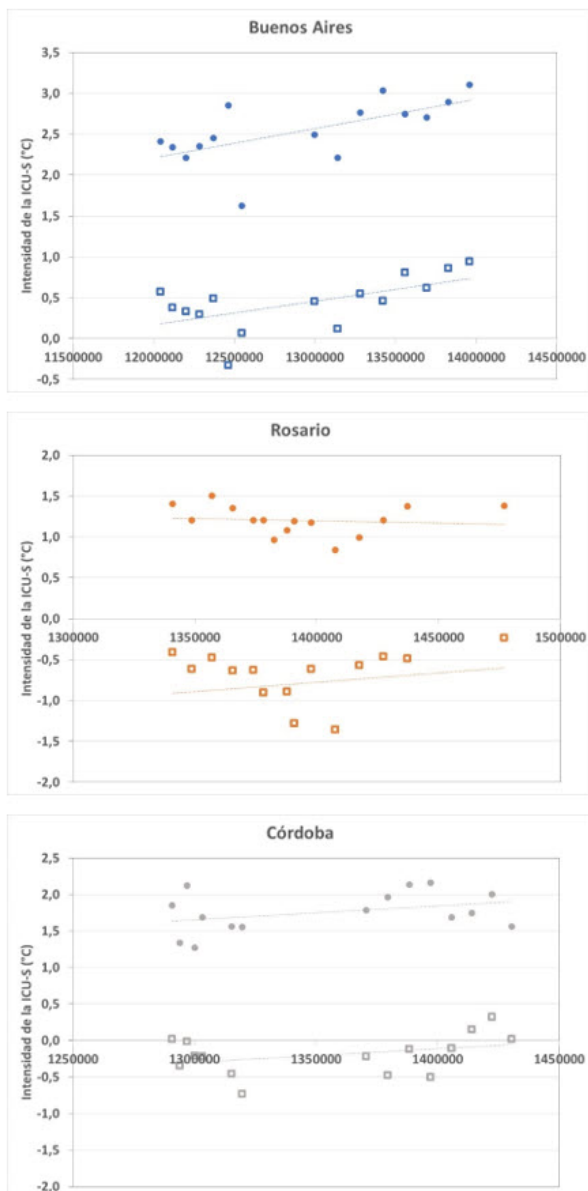


Figura 11: Relación entre la intensidad media (cuadrados) y máxima (puntos) anual (°C) de la IUC-S diurna de Buenos Aires, Rosario y Córdoba y la población estimada en cada aglomerado para cada año (2003-2017). Las líneas punteadas indican las rectas de regresión lineal.

entre 2003 y 2017 (<https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>). Los resultados correspondientes a la ICU nocturna son consistentes con los obtenidos por Camilloni y Barrucand (2012) que identifican para Buenos

Aires para el período 1960-2007 una reducción en su intensidad explicada por un conjunto de factores atmosféricos como la disminución de las condiciones de cielo claro o con baja nubosidad y un incremento en la velocidad del viento.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un estudio de la variabilidad espacio-temporal de la ICU-S para tres ciudades de Argentina (Buenos Aires, Rosario, Córdoba) para el período 2003-2017 utilizando datos de 1 km x 1 km de resolución derivados de información satelital disponibles a través del *Global Surface UHI Explorer* desarrollado por la Universidad de Yale. Los datos fueron procesados con el Sistema de Información Geográfica *QGis* para computar, para cada ciudad, los valores de IUC-S medios y extremos a nivel diurno y nocturno para el promedio anual, verano e invierno y su correspondiente evolución temporal. Asimismo, se calculó la proporción del territorio urbano que presenta valores positivos y negativos de intensidad de IUC-S y las correspondientes tendencias.

Durante las horas del día, la magnitud de la IUC-S es positiva en los tres aglomerados estudiados durante el verano y en el promedio anual de Buenos Aires, aunque siempre alcanzando menores contrastes en la temperatura urbana-rural superficial que en las horas nocturnas. En el resto de los casos (invierno en las tres ciudades y en el promedio anual de Rosario y Córdoba) se encuentra que la intensidad es negativa generando el efecto conocido como isla fría que, en el promedio de invierno, cuando es más marcado, oscila entre $-0,4^{\circ}\text{C}$ para Buenos Aires y $-1,6^{\circ}\text{C}$ en Rosario. Las tendencias en la intensidad de la IUC-S diurna son positivas en los valores medios y extremos, pero alcanzan significancia estadística sólo en Buenos Aires que podrían ser explicadas al menos en parte por el incremento de la población urbana entre 2003 y 2017. En términos de extensión espacial, la proporción media de área urbana con IUC-S cálida durante

el día es mayoritaria sólo en Buenos Aires (75 %) con una tendencia a la expansión a razón de 7 % de la superficie por década. Por el contrario, en Rosario y Córdoba la superficie de la ciudad donde la temperatura urbana diurna supera a la rural es de 35 % y 42 % respectivamente.

En las tres ciudades se encuentra que, en promedio durante el período de estudio, la temperatura de la superficie urbana es superior a la rural (IUC-S positiva) durante la noche tanto en la media anual como en verano e invierno. El mayor contraste se registra siempre en Buenos Aires donde alcanza el máximo de $+2^{\circ}\text{C}$ durante el verano y el mínimo en invierno ($+1,5^{\circ}\text{C}$). En el caso de Rosario y Córdoba la diferencia en la magnitud entre el verano e invierno es de sólo $0,1^{\circ}\text{C}$. El máximo valor anual es $+4,3^{\circ}\text{C}$ en Buenos Aires, $+3,6^{\circ}\text{C}$ en Rosario y $+3,5^{\circ}\text{C}$ en Córdoba sugiriendo una relación entre la intensidad máxima de la IUC-S nocturna y el tamaño de la ciudad en términos de población y extensión. Las tendencias en la magnitud anual de la ICU-S nocturna son negativas en los promedios y positivas en los máximos para las tres ciudades pero en ningún caso presentan significancia estadística. El área de cada ciudad que registra temperaturas de superficie superiores a la de las zonas rurales durante la noche es mayoritaria y representa en promedio el 93 % del total para Buenos Aires, 97 % para Rosario y 89 % para Córdoba. La comparación entre las islas de calor de canopia (ICU) y superficial (ICU-S) para la ciudad de Buenos Aires para el período 2003-2017 demuestran que el exceso de calor urbano es un fenómeno que predomina durante las horas de la noche en ambos casos, aunque de mayor magnitud en ICU-S en el promedio anual ($+0,3^{\circ}\text{C}$) y durante el verano ($+0,6^{\circ}\text{C}$). Por el contrario, en el invierno y durante las horas del día, se identifica el efecto inverso siendo la ciudad más fría que el entorno rural tanto a nivel de canopia como en la superficie. En este caso la isla fría tiene una magnitud de $-1,6^{\circ}\text{C}$ para ICU y $-0,4^{\circ}\text{C}$ para ICU-S. El análisis de la evolución temporal del promedio anual

de ICU muestra una tendencia a la reducción de su magnitud durante las horas de la noche indicando una reducción en las diferencias de la temperatura del aire urbana-rural que contrasta con la tendencia positiva hallada para IUC-S diurna que señala un progresivo incremento en la temperatura de la superficie de Buenos Aires.

El cambio en el uso del suelo causado por la urbanización es el principal factor que da origen al exceso de calentamiento en las ciudades a través de modificaciones en el balance de energía de la superficie como consecuencia de los materiales y geometría urbanos que favorecen la absorción de radiación solar debido a la mayor cantidad de fachadas expuestas a la insolación, la escasez de vegetación que reduce el enfriamiento por evapotranspiración y el aumento de la rugosidad que desacelera el viento y por consiguiente la pérdida de calor. A esto se suma la liberación de calor como consecuencia de las diferentes actividades humanas y los procesos de combustión que se llevan a cabo en áreas urbanas. Asimismo, la magnitud de la diferencia entre las temperaturas urbanas y rurales son el resultado de complejas interacciones con otros factores climáticos como la nubosidad y la velocidad del viento y no climáticos como tamaño y población de la ciudad.

En resumen, los resultados obtenidos muestran que la ICU-S está siempre presente durante la noche, así como en las horas diurnas de verano en las tres ciudades analizadas. Asimismo, en Buenos Aires, donde reside más del 30 % de la población del país, se observa una tendencia al incremento en la magnitud media y máxima de la ICU-S diurna. En consecuencia, la mitigación de este fenómeno debe ser una prioridad dentro de la planificación urbana debido a los riesgos ambientales y sociales que implican el incremento sostenido de las temperaturas urbanas en las tres ciudades más grandes de Argentina. Entre los métodos disponibles para reducir la temperatura de superficie se encuentra el empleo de materiales más reflectivos que los actualmente utilizados, así

como la implementación de soluciones basadas en la naturaleza que contribuyan entre otros factores con el proceso de enfriamiento a través de la estimulación de la evapotranspiración y la generación de sombra.

Agradecimientos: Las autoras agradecen a la Dra. Cintia Piccolo y a un revisor anónimo sus valiosos comentarios y sugerencias en la revisión de este artículo. Los siguientes proyectos financiaron este trabajo: Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica - Argentina Innovadora 2020 (PICT2016-1422) y Universidad de Buenos Aires (UBACYT-20020170100666BA).

REFERENCIAS

- Arnfield, A.J. 2003. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int. J. of Climatol.* 23, 1–26.
- Azevedo, J., Chapman, L. and Muller, C. 2016. Quantifying the Daytime and Night-Time Urban Heat Island in Birmingham, UK: A Comparison of Satellite Derived Land Surface Temperature and High Resolution Air Temperature Observations. *Remote Sensing*, 8, 153.
- Barros, V. and Camilloni, I. 1994. Urban-biased trends in Buenos Aires' mean temperature. *Clim.Res.*4, 33-45.
- Bejarán, R. and Camilloni, I. 2003. Objective method for classifying air masses: an application to the analysis of the Buenos Aires' (Argentina) urban heat island intensity. *Theor. and Appl. Climatol.* 74, 93-103.
- Benas, N., Chrysoulakis, N. and Cartalis, C. 2017. Trends of urban surface temperature and heat island characteristics in the Mediterranean. *Theor Appl Climatol* 130, 807–816.
- Camilloni, I. and Barros, V., 1997. On the Urban Heat Island Effect Dependence on Temperature Trends. *Climatic Change* 37, 665–681.
- Camilloni, I. and Barrucand, M. 2012. Temporal variability of the Buenos Aires, Argentina, urban heat island. *Theor.and Appl. Climatol.* 107, 47-58.
- Camilloni, I. y Mazzeo, N. 1987. Algunas características térmicas de la atmósfera urbana de Buenos Aires. *Anales del II Congreso Interamericano y V Congreso Argentino de Meteorología.*
- Casadei, P., Semmartin, M. y Garbulsky, M. 2021. Análisis regional de las islas de calor urbano en la Argentina. *Ecología Austral* 31,190-203.
- Chakraborty, T. and Lee, X. 2019. A simplified urban-extent algorithm to characterize surface urban heat islands on a global scale and examine vegetation control on their spatiotemporal variability. *J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 74, 269-280.
- Chakraborty, T., Sarangi, C. and Tripathi, S.N., 2016. Understanding diurnality and interseasonality of a sub-tropical urban heat island. *Boundary-Layer Meteorol.* 1–23.
- Chen, G., Li, X., Liu, X., Chen, Y., Liang, X., Leng, J., Xu, X., Liao, W., Qiu, Y., Wu, Q. and Huang, K. 2020. Global projections of future urban land expansion under shared socioeconomic pathways. *Nat Commun.* 11, 537.
- Correa, E., De Rosa, C. y Lesino, G. 2006. Isla de calor urbana. Distribución espacio-temporal de temperaturas dentro del Área Metropolitana de Mendoza. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 10, 121-128.
- Cui, Y.Y. and De Foy, B., 2012. Seasonal variations of the urban heat island at the surface and the near-surface and reductions due to urban vegetation in Mexico city. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 51 (5), 855–868.
- Cúnsulo, M., Papparelli, A. y Kurbán, A. 2011. Variación temporal de la isla de calor y de la ocupación urbana en San Juan-Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 15, 27-36.
- de la Casa, A.C. and Nasello, O.B. 2014. Thermal Conditions in Córdoba City, Argentina, during 1960-2010 Period.

- American Journal of Climate Change, 3, 193-204.
- Deng, C.B. and Wu, C.S. 2013. Examining the impacts of urban biophysical compositions on surface urban heat island: a spectral unmixing and thermal mixing approach. *Remote Sens. Environ.*, 131, 262-274.
- Du, H.Y., Wang, D.D., Wang, D.D., Zhao, X.L., Qin, F., Jiang, H. and Cai, Y.L. 2016. Influences of land cover types, meteorological conditions, anthropogenic heat and urban area on surface urban heat island in the Yangtze River Delta urban agglomeration. *Sci. Total Environ.*, 571, 461-470.
- Ferrelli, F., Bustos, M.L. y Piccolo, M.C. 2016. Modificaciones en la distribución espacial de la temperatura y la humedad relativa como resultado del crecimiento urbano: el caso de la ciudad de Bahía Blanca, Argentina. *Revista de Climatología* 16, 51-61.
- Figuerola, P. and Mazzeo, N. 1998. Urban-rural temperature differences in Buenos Aires. *Int.J.Climatol.* 18, 1709-1723.
- Gu, Y. and Li, D. 2018. A modeling study of the sensitivity of urban heat islands to precipitation at climate scales. *Urban Climate* 24, 982-993.
- Haashemi, S., Weng, Q.H., Darvishi, A. and Alavipanah, S.K.. 2016. Seasonal variations of the surface urban heat island in a semi-arid city. *Remote Sens.* 8, 17.
- Heaviside, C., Macintyre, H. and Vardoulakis, S., 2017. The Urban Heat Island: Implications for Health in a Changing Environment. *Curr Envir Health Rpt* 4, 296-305.
- Howard L. 1833. The climate of London: deduced from meteorological observations made in the metropolis and at various places around it, vol 2. Harvey and Darton, J. and A. Arch, Longman, Hatchard, S. Highley [and] R. Hunter.
- INDEC, 2012. Censo nacional de población, hogares y viviendas 2010: censo del Bicentenario: resultados definitivos, Serie B N° 2. - 1a ed. - Buenos Aires.
- INDEC, 2021. Población: proyecciones y estimaciones. En <https://www.indec.gov.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-24-119> (último acceso junio 2021)
- Kato, S., Matsunaga, T. and Yamaguchi, Y., 2010. Influence of shade on surface temperature in an urban area estimated by ASTER data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Kyoto Japan* 38, 925-929.
- Kalnay E. and Cai M., 2003. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature* 423 528-31.
- Li, H., Meier, F., Lee, X., Chakraborty, T., Liu, J., Schaap, M., Soudoudi, S., 2018. Interaction between urban heat island and urban pollution island during summer in Berlin, *Sci. of The Total Environ.* 636, 818-828.
- Li, J., Zhou, M., Lenschow, D. H., Cheng, Z., & Dou, Y., 2020. Observed relationships between the urban heat island, urban pollution island, and downward longwave radiation in the Beijing area. *Earth and Space Science*, 7, e2020EA001100.
- Manoli, G., Fatichi, S., Schläpfer, M., Yu, K., Crowther, T., Meili, N., Burlando, P., Katul, G. and Boud-Zeid, E. 2019. Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. *Nature* 573, 55-60.
- Maristany, A., Abadía, L., Angiolini, S., Pacharoni, A. y Pardina, M. 2008. Estudio del fenómeno de la isla de calor de en la ciudad de Córdoba – Resultados preliminares. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 12, 69-75.
- Nassar, A. K., Blackburn, G.A. and Whya, J.D., 2017. What controls the magnitude of the daytime heat sink in a desert city? *Applied Geography* 80, 1-14.
- Oke, T.R. 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 108, 1-24.
- Oke, T., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. .2017. Urban Heat Island. In *Urban Climates* (pp. 197-237). Cambridge: Cambridge University Press.
- Peng, S., Piao, S. Ciais, P., Friedlingstein,

- P. Ottele, C., Bréon, F.M., Nan, H., Zhou, L. and Myneni, R.B. 2012. Surface Urban Heat Island Across 419 Global Big Cities. *Environmental Science & Technology* 46, 696-703.
- Phelan, P., Kaloush, K., Miner, M., Golden, J., Phelan, B., Silva, H., and Taylor, R., 2015. Urban Heat Island: Mechanisms, Implications, and Possible Remedies. *Annual Review of Environment and Resources* 40, 285-307.
- Puliafito, S.E., Bochaca, F. y Allende, D. 2013. Mitigación de la isla de calor urbana en ciudades de zonas áridas. *Proyecciones* 11, 29-45.
- Roth, M., 2013. Urban Heat Islands. In: *Handbook of Environmental Fluid Dynamics, Volume Two*, edited by Harindra Joseph Sermal Fernando, CRC Press/Taylor & Francis Group, LLC.
- Rusticucci, M. y Vargas, W. 1991. Efecto de la ciudad y el río sobre la temperatura de superficie de Buenos Aires. *Geoacta* 18, 35-48.
- Sachindra, D.A., Ng, A., Muthukumar, S. and Perera, B.. 2015. Impact of Climate Change on Urban Heat Island Effect and Extreme Temperatures: A Case Study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 142. 10.1002/qj.2642.
- Santamouris, M.; Cartalis, C.; Synnefa, A.; Kolokotsa, D., 2015. On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—A review. *Energy Build.* 98, 119–124.
- Schwarz, N., Lautenbach, S. and Seppelt, R. 2011. Exploring indicators for quantifying surface urban heat islands of European cities with MODIS land surface temperatures. *Remote Sens. Environ.*, 115, 3175-3186.
- Sobrino JA, and I. Irakulis I. 2020. A Methodology for Comparing the Surface Urban Heat Island in Selected Urban Agglomerations Around the World from Sentinel-3 SLSTR Data. *Remote Sensing* 12(12):2052. <https://doi.org/10.3390/rs12122052>.
- Souch, C. and Grimmond, S. 2006. Applied climatology: urban climate. *Progr. Phys. Geogr.* 30 (2), 270–279.
- Takebayashi, H. and Moriyama, M. 2007. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Build. Environ.*, 42, 2971-2979.
- UN, 2018. United Nations Department of Economic Social Affairs Population Division. *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision; Online Edition; United Nations: New York, NY, USA.*
- Vega, M., Cespedes, L., Lombardo, F., Re, G., Garcia, N., Busnelli, A., Del Fedele, F., Lopez, M., Pomar, J., Salvati, A., and Piacentini, R. 2019. Measurements and Modelization of the Rosario City Heat Island, Argentina - Preliminary Results IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 471 092088.
- Wu, X., Wang, G., Yao, R., Wang, L., Yu, D, and Gui, X. 2019. Investigating Surface Urban Heat Islands in South America Based on MODIS Data from 2003–2016. *Remote Sensing*. 11(10):1212. <https://doi.org/10.3390/rs11101212>.
- Xu, S.L. 2009. An approach to analyzing the intensity of the daytime surface urban heat island effect at a local scale. *Environ. Monit. Assess.*, 151, 289-300.
- Yao, R., Wang, L., Huang, X., Liu, Y., Niu, Z., Wang, S. and Wang, L. 2021. Long-term trends of surface and canopy layer urban heat island intensity in 272 cities in the mainland of China, *Science of The Total Environment*, 772, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145607>.
- Zhao L., Lee X., Smith R.B. and Oleson, K. 2014. Strong contributions of local background climate to urban heat islands. *Nature* 511, 216–219.
- Zhao, S.; Liu, S.; Zhou, D., 2016. Prevalent vegetation growth enhancement in urban environment. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 113, 6313–6318.
- Zhou, D.; Zhao, S.; Zhang, L.; Liu, S., 2016. Remotely sensed assessment of urbanization effects on vegetation phenology in China's 32 major cities. *Remote Sens. Environ.* 176,

272–281.

Zhou, D., Xiao, J., Bonafoni, S., Berger, C., Deilami, K., Zhou, Y., Froking, S., Yao, R., Qiao, Z., Sobrino, J.A., 2019. Satellite remote sensing of surface urban heat islands: progress, challenges, and perspectives. *Remote Sens.* 11, 48.