

¿En qué medida la forma urbana afecta al comportamiento térmico exterior? Un estudio para reducir la isla de calor urbana en una ciudad árida.

María Belén Sosa¹, Erica Correa Cantaloube², María Alicia Cantón³

Resumen

El paisaje construido modifica los parámetros micro-climáticos de un sitio. Una de las principales alteraciones es el aumento de la temperatura del aire, que da origen al fenómeno de isla de calor urbano (ICU). La ICU aumenta la demanda de energía eléctrica y disminuye la habitabilidad de los espacios interiores y exteriores. Este trabajo busca identificar formas urbanas que colaboren a reducir el efecto de la ICU en Mendoza; mediante el análisis y comparación del comportamiento térmico de 10 canales viales urbanos (CVU) representativos durante el periodo de verano. Los resultados del trabajo muestran que los CVU de tipo abierto-forestado se mantienen más frescos en comparación al caso compacto-sin forestación, $\Delta T^{\circ}\text{media}=2.5^{\circ}\text{C}$. Pero, para proponer un esquema de crecimiento urbano de tipo abierto-forestado en ciudades de clima árido es necesario analizar en profundidad otros aspectos del urbanismo, además del energético-ambiental, que sirvan para asegurar el desarrollo urbano sustentable.

Palabras clave: isla de calor urbano, ciudades áridas, forma urbana, desarrollo urbano sustentable.

To what extent urban form affects the exterior thermal behavior? A study for reduce the urban heat island in an arid city.

Abstract

The built landscape modifies the micro-climatic parameters of a site. One of the major impacts is the increase of the air temperature, which gives rise to the phenomenon of urban heat island (UHI). The UHI increases the demand for electricity and decreases the livability of the interior and exterior spaces. This paper aims to identify urban forms that help to mitigate the effect of the UHI in Mendoza; analyzing and comparing the thermal behavior of 10 representative urban canyons during the summer. The results show that the open-forested group of cases keeps cooler compared to the compact-without forestation, $\Delta T^{\circ}\text{mean}=2.5^{\circ}\text{C}$. But to propose the open-forested scheme for urban growth in

^{1 2 y 3} Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INHAE-CONICET-CCT Mendoza). Av. Ruiz Leal s/n, Parque Gral. San Martín, Mendoza, Argentina. Tel: +54-261-54-4300. e-mail: msosa@mendoza-conicet.gob.ar

arid cities, it is necessary to perform a discussion that consider other aspects of urban planning, including the energetic and environmentally standpoint, to ensure sustainable urban development.

Keywords: urban heat island, arid cities, urban form, sustainable urban development.

Introducción

Se conoce que las ciudades —paisaje construido— consumen mayor cantidad de energía por unidad de superficie en comparación a un ecosistema natural —paisaje natural— (Odum, 1980). Esta energía es necesaria para dar funcionamiento al denominado “metabolismo urbano” (Wolman, 1965). Dicho metabolismo impacta en el paisaje natural modificando, entre otros factores, los parámetros del clima en dos escalas: macro-escala calentamiento global y micro-escala alteración del clima urbano. Una de las principales alteraciones del clima urbano da origen al fenómeno denominado isla de calor urbana (ICU), que genera que en el centro de la ciudad la temperatura del aire sea mas elevada en relación con el ambiente natural circundante (Oke, 1982).

En las ciudades, los canales viales urbanos (CVU) usualmente cubren más de un cuarto del total del área urbana, por lo tanto su morfología, materialidad y orientación modifican en gran medida los parámetros del clima urbano (Shashua-Bar, et al 2003). Así mismo, las alturas de las edificaciones (Lin, et al, 2010, Ruiz, et al, 2015), las propiedades termofísicas de los materiales usados en sus envolventes (Alchapar, 2015) sumado a la escasez de zonas verdes; pueden crear combinaciones urbanas térmicamente inadecuadas. Siendo estos factores posibles promotores e intensificadores de la formación de la ICU (Givoni, 1989).

El área de estudio, Área Metropolitana de Mendoza (AMM), se sitúa en el centro-oeste de Argentina, su clima es de tipo árido y su geomorfología esta formada por un cordón montañoso al oeste que decrece hasta formar mesetas. Las ciudades desarrolladas en este tipo de clima, pueden presentar dos tipos de modelos urbanos: compacto y abierto. El modelo compacto tiene un desarrollo urbano continuo, conformado por edificios altos y calles estrechas, el uso de vegetación es inexistente o escaso. Por otro lado, el modelo abierto —como es el área de estudio— tiene calles anchas y construcciones relativamente bajas, e intensa forestación que conforman túneles verdes (Correa, et al, 2010).

En el AMM habita el 62.8% del total de la población de Mendoza y, particularmente, durante la última década la población urbana se incrementó en un 9.4% (INDEC, 2010). Este aumento de población genera una expansión del paisaje construido. La forma de crecimiento y disposición de esta expansión impacta en las condiciones climáticas naturales del sitio de inserción. Este escenario colabora a que se aumente la absorción y retención de la radiación solar (inercia térmica) y la rugosidad de suelo; factores que modifican los patrones de escurrimiento, infiltración y evaporación. Como así también, aumenta la capa límite térmica y mecánica afectando la penetración de vientos (Oke, 1982). Estrictamente desde un punto de vista térmico, esta alteración de los perfiles de viento, afecta las posibilidades de enfriamiento de tipo convectivo tanto en la periferia como del centro de la ciudad, dificultando los procesos de renovación y purificación del aire urbano.

Desde hace más de 10 años el Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda – INCIHUSA – CONICET – CCT Mendoza investiga la existencia, causas y consecuencias del fenómeno en el AMM. Donde uno de los principales impactos que genera la ICU es el incremento de hasta un 20% en el consumo energético para enfriar las edificaciones durante el verano. Así mismo, este fenómeno, deteriora la calidad del

aire y las condiciones de confort térmico provocando una disminución del grado de habitabilidad y uso de los espacios abiertos públicos (Correa, 2008).

Particularmente, en el año 2014 se registró una intensa ola de calor en el AMM que aumentó la temperatura del aire a valores de más de 40°C. En respuesta a este aumento, los edificios utilizaron de manera exhaustiva los equipos de refrigeración para satisfacer las necesidades de confort térmico interior. Esta situación provocó que se alcanzaran valores records de consumo de energía eléctrica, donde la demanda de potencia máxima del mes de Enero de 2014 tuvo una variación de +11.5% respecto al mismo mes del año anterior (EPRE, 2014).

Es por ello, que la caracterización de la ICU es una herramienta que permite evaluar y cuantificar el incremento en los consumos energéticos vinculado a los patrones de asentamiento o desarrollo de la ciudad. Donde el diagnóstico de este fenómeno —como indicador de sustentabilidad urbana— puede posibilitar el desarrollo de estrategias para reducir y mitigar los efectos que ejerce la ciudad sobre el clima.

Dentro de este contexto, el trabajo plantea como objetivo conocer, analizar y comparar el comportamiento térmico de diversas tramas urbanas de baja densidad edilicia, para identificar el mejor esquema urbano (combinación morfológica y forestal), que colabore a reducir el efecto de la isla de calor en el AMM.

Metodología

El proceso de selección de los casos de estudio está descrito, analizado y caracterizado de acuerdo a 3 escalas: 1. Macro-escala (departamento), 2. Meso-escala (trama urbana) y 3. Micro-escala (canal vial). Asimismo, se detalla el proceso de adquisición de datos meteorológicos y monitoreo a fin de conocer y caracterizar su comportamiento térmico.

1. Macro-escala, selección de departamentos

El AMM está conformado por 6 departamentos: Capital, Las Heras, Godoy Cruz, Guaymallén, Maipú y Luján de Cuyo. Con el objetivo de delimitar el área de estudio, se seleccionaron los departamentos de mayor ocupación demográfica según los datos del censo realizado por el INDEC en el año 2010. Como resultado de este análisis, los departamentos de mayor ocupación son los 3 que limitan con la capital de la provincia: Guaymallén (16%), Las Heras (12%), Godoy Cruz (11%). Asimismo, la Capital de la provincia (6%) se seleccionó por ser el departamento central del AMM, sin embargo en la última década su población ha disminuido en un 1%. Este dato demuestra, entre otros factores, como las áreas residenciales se han ido desplazando hacia otros sectores de la ciudad.

Con el fin de caracterizar y cuantificar los tipos de tramas urbanas existentes dentro de los 3 departamentos seleccionados, se realizó un relevamiento de tipologías de manzanas. Esta tipificación se realizó utilizando un plano catastral del año 2012 y el software AutoCAD®, de acuerdo a 4 formas:

Manzana Damero: Los cuatro lados tienen iguales dimensiones, indicado en color lila.

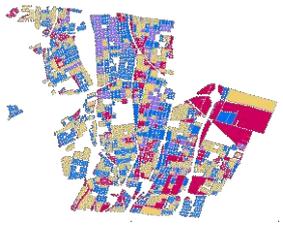
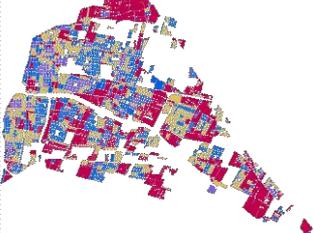
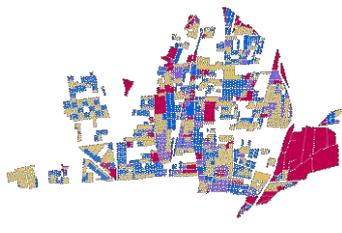
Manzana Rectangular: Dos de sus lados tienen mayor longitud. En el relevamiento se diferencian según la orientación de mayor exposición en eje Norte-Sur (color celeste) o Este-Oeste (color naranja).

Manzana Irregular: Pueden tener 4 o más lados de diferentes longitudes, indicado en color magenta.

Los resultados del relevamiento gráfico se detallan en la tabla 1, donde se muestran los mapas de cada departamento con su correspondiente codificación de color por tipología de manzana y se indica el

porcentaje que representa dentro del departamento. Al analizar los datos del relevamiento, se concluye que en Godoy Cruz la forma con mayor representatividad es la de tipo rectangular en ambas orientaciones (31%). Caso contrario sucede en Guaymallén donde la forma de manzana más representativa es la de tipo irregular (48%). Por último el departamento de Las Heras coincide en mantener su forma irregular (33%), seguida por la forma rectangular con orientación Norte-Sur (30%). Cabe aclarar que el departamento Capital no se relevó mediante esta metodología ya que se conoce que la forma de manzana más representativa es la damero (Stocco, et. al, 2013).

Tabla 1. Tipificación y cuantificación de manzanas por departamento.

	Godoy Cruz	Guaymallén	Las Heras
Planimetría			
Damero (%)	10	7	10
Rect. E-O (%)	31	25	30
Rect. N-S (%)	31	20	27
Irregular (%)	28	48	33

2. Meso-escala, selección de tramas urbanas

A partir de la tipificación de morfologías de manzanas, en los 4 departamentos seleccionados, se escogieron 4 conjuntos urbanos (barrios) de diversas tramas. Se entiende por trama urbana a la forma que generan un conjunto de calles y manzanas que existen en un sector de territorio (Marshall, 2005).

En este estudio se escogieron 4 tipologías de tramas que difieren en cuanto a forma y orientación, pero que al mismo tiempo mantienen similares ciertas características que permiten comparar e identificar a las morfologías con mejor comportamiento térmico. Las características a mantener constantes se agrupan en 2 niveles: **1. Entorno:** uso residencial y grado de enverdecimiento (el porcentaje de verde se determinó mediante el análisis de imágenes multiespectrales con el sistema de procesamiento MultiSpec©), **2. Características del barrio:** ancho (WC) y material de calle (MC), superficie edificada promedio por lote (SSPL), altura media de las casas (HMC), relación altura media edificada sobre ancho de calle (H/W), material fachada (MF), ancho (WV) y material de vereda (MV) y especie forestal (EF). La tabla 2 muestra los valores del análisis y características de los 4 barrios seleccionados del AMM.

Cabe destacar que el caso 4, denominado como 4° sección de la ciudad, es considerado como caso atípico para el área de estudio. En esta área existe una calle de ancho notablemente menor (5.5m) al predominante en el AMM (16, 20 y 30m) y sin forestación. Este caso compacto se contrastó con 2 calles colindantes de ancho y esquema de forestación característico de la zona y similares a los barrios seleccionados.

3. Micro-escala, selección de canales viales urbanos

Para seleccionar el sitio de monitoreo microclimático dentro de cada barrio, se buscaron aquellos canales viales urbanos (CVU) que fueran representativos dentro de cada trama seleccionada. Dichos

CVU se caracterizaron mediante 3 grupos de descriptores e indicadores, de tipo: morfológico, forestal y cobertura. Este último grupo —cobertura— se añade con el objetivo de clasificar y caracterizar a los casos con el estudio de Stewart y Oke (2012), Local climate zones for urban temperature studies (LCZ).

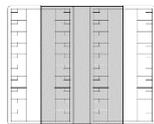
Tabla 2. Descriptores y valores de los 4 casos seleccionados.

Caso	1. Multi-azimutal B° Fuchs	2. Cul-de-Sac B° Cadore	3. Rectangular B° Cementista	4. Reticular 4° sección ciudad	
Trama urbana					
Departamento	Godoy Cruz	Guaymallén	Las Heras	Capital	
Porcentaje de verde	12%	13%	13%	14%	
WC (m)	20	16	16 - 20	20	5.5
MC	Asfalto	Asfalto	Concreto	Concreto	
HMC (m)	3	3	3	3	
SSPL (m2)	80	80	80	80	
H/W	0.15	0.15	0.15/0.19	0.15	0.55
MF	Pintura clara	Pintura clara	Pintura clara	Pintura clara	
WV (m)	3	3	3	3	1
WM	Baldosa calcárea	Baldosa calcárea	Baldosa calcárea	Baldosa calcárea	
EF	<i>Morus alba</i>	<i>Ulmus umbraculifera</i>	<i>Morus alba</i>	<i>Tipuana tipu</i>	-

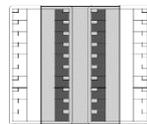
A continuación se presentan los descriptores e indicadores utilizados en cada grupo:

1. Morfológicos: largo (L), ancho (W), superficie del canal vial (SCV), azimut (Az), eje de orientación (O), cantidad viviendas (CV), superficie total construida (STC), volumen total construido (VTC), compacidad (C) y factor de visión de cielo (SVF). La figura 1 sintetiza el área considerada como área de estudio.

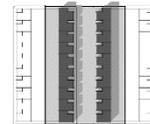
Figura 1. Descripción del área considerada de estudio (CVU), indicada en color gris.



Superficie del canal vial (SCV) (m2):
Considerada como área de estudio, sumatoria de las superficies de las parcelas que dan frente sobre la calle + aceras y calzada.



Superficie total construida (STC) (m2): Sumatoria de las superficies edificadas dentro del área de estudio.



Volumen total construido (VTC) (m3):
Resultado de multiplicar la superficie total construida por la altura de las construcciones. Expresión= $STC \times H$

2. Forestales: número de árboles (NA).

3. Cobertura: porcentaje de superficie sellada (PSS), porcentaje de superficie permeable (PSP) y rugosidad del suelo (R) y clase climática según Oke (LCZ).

A partir de esta caracterización se establecieron los casos de estudio a micro-escala, CVU, dentro de cada trama. Donde para la trama multi-azimutal, caso 1 (B° Fuchs), se seleccionaron los 2 CVUs rectangulares que tienen leves cambios en su orientación, siendo el eje de mayor exposición E-O. Para la trama discontinua, caso 2 (B° Cadore) se seleccionó 1 CVU con orientación E-O. En la trama rectangular, caso 3 (B° Cementista) se seleccionaron 4 CVUs; 3 con orientación N-S de distintos largos y 1 con orientación E-O. Por último, en la trama reticular caso 4 (Centro, 4° sección) se seleccionó el CVU que responde a la condición de atípica —compacta y sin forestación— y también los 2 CVUs colindantes típicos —abiertos y forestados—. En la tabla 3 se muestran los valores de los descriptores e indicadores utilizados para caracterizar cada caso.

Tabla 3. Valores de descriptores e indicadores utilizados en cada grupo de caracterización.

Forma de trama		Multi-azimutal		Cul-de-Sac	Rectangular				Reticular		
Caso		1.a	1.b	2	3.a	3.b	3.c	3.d	4.a	4.b	4.c
Planimetría											
1. Morfológicos	L (m)	255	226	145	128	192	83	81	116	110	112
	W (m)	20	20	20	16	16	20	20	20	20	5.5
	SCV (m ²)	15086	13470	9545	7129	10990	4070	5277	7651	7929	3600
	Az (°)	146	193	81	181	181	92	184	89	89	85
	O (°)	E-W	E-W	E-W	N-S	N-S	E-W	N-S	E-W	E-W	E-W
	CV (u)	47	43	28	20	32	16	16	21	19	22
	STC (m ²)	5699	4809	2945	2492	3789	1539	2759	3596	3242	2326
	VTC (m ³)	17097	14427	8835	7476	11367	4617	8277	10788	9726	6978
	C (VTC / SCV)	1.13	1.07	0.93	1.05	1.03	1.13	1.03	1.41	1.23	1.94
	SVF										
	0.69	0.60	0.57	0.27	0.35	0.61	0.46	0.16	0.50	0.74	
2	NA (u)	53	52	36	44	53	21	23	31	24	0
	PSS (%)	38	36	31	35	35	45	40	47	40	65
	PSP (%)	32	29	39	36	37	30	22	23	31	18
	R	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5
	LCZ	6b	6b	6b	6b	6b	6b	6b	6b	6b	3

Al analizar los valores de los descriptores morfológicos se desprende que tanto el largo, la superficie del canal vial, la cantidad viviendas (esta en relación al largo de calle), la superficie y volumen total construido y la compacidad varían entre los 10 casos. El ancho de calle varía entre 3 dimensiones: 20 (7 CVUs), 16 (2 CVUs) y 5.50m (1 CVU - 4.c). El azimut también varía, ya que depende de la orientación de la manzana (considerando azimut 0° al Sur) y en cuanto a los ejes de orientación, 3 CVU están en sentido N-S y 7 en E-O. El indicador SVF, que también varía, fue calculado a partir de imágenes hemisféricas capturadas con una cámara digital Nikon® CoolPix equipada con un lente ojo de pez; procesadas con el software Píxel de Cielo desarrollado por Correa (2006). Este software obtiene el valor de SVF en condiciones de cielo despejado, con forestación urbana intensa y en ciudades con alta reflectividad, típica de regiones áridas como es el caso de este estudio.

Dentro de la categoría forestal, el número de árboles varía entre 0 (caso sin forestación, 4.c) y 53. Por último, la clasificación climática muestra que 9 casos corresponden al LCZ 6_b, esquema urbano abierto-forestado, de uso residencial y baja altura, donde el SVF a nivel de la calle se reduce ligeramente por

la existencia de forestales. En cambio, el caso denominado 4.c corresponde a la categoría LCZ 3, donde la edificación también es de baja altura, la cobertura de suelo es pavimentada y no hay forestación.

4. Monitoreo y obtención de datos microclimáticos

Con el propósito de recopilar los valores de las variables microclimáticas para conocer el comportamiento térmico de cada CVU, se instaló un sensor fijo en cada calle desde el 8 de enero hasta el 10 de febrero de 2014 (32 días corridos). Cada sensor de tipo H08-003-02 se ubicó a una altura de 2 m desde el nivel de la calle (Oke, 2004), dentro de una caja blanca de PVC perforada, con el objeto de evitar la irradiación y asegurar una adecuada circulación de aire. Las mediciones de temperatura, humedad relativa y humedad absoluta fueron programadas cada 15 minutos.

Resultados

Los resultados del monitoreo microclimático de los 10 CVU localizados en los 4 barrios seleccionados se analizaron en 2 etapas: 1. Comportamiento térmico de cada CVU y 2. Comparación de los CVU más frescos y más cálidos dentro y entre cada trama. Cabe destacar que en el trabajo se analizan los valores de temperatura máxima por ser uno de los factores que determina el grado de habitabilidad del espacio exterior, la temperatura mínima que refleja las posibilidades de enfriamiento —considerada como una estrategia para reducir la ICU— y la temperatura promedio que se relaciona con el consumo energético para el acondicionamiento térmico de edificios mediante el concepto de los grados día de refrigeración y calefacción (Al-Homoud, 1998).

1. Comportamiento térmico de cada CVU

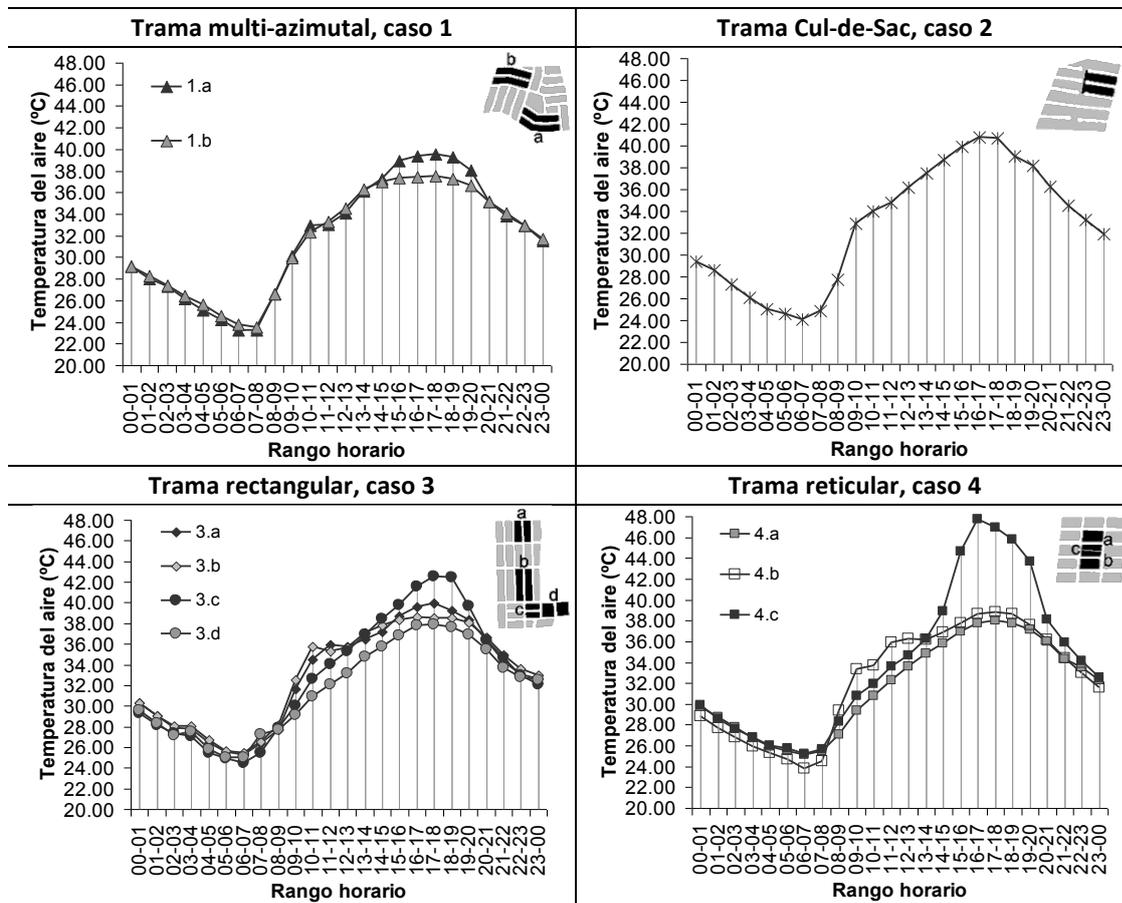
La tabla 4 muestra el comportamiento de cada caso durante el día típico seleccionado (15/01/2014). Este día se reconoce como típico ya que su condición térmica es representativa del 74% de los 32 días monitoreados. Como primera observación se pone de manifiesto que la configuración más cálida es la correspondiente al CVU compacto-sin forestación (caso 4.c). Y que la configuración que mantiene su temperatura más fresca es la correspondiente al caso de trama multi-azimutal, abierta-forestada (caso 1.b). Es decir que, *a priori*, las tramas insertas en esquemas urbanos abiertos-forestados se mantienen más frescas tanto durante el periodo de calentamiento como en el de enfriamiento, en comparación al caso de esquema compacto-sin forestación.

a. Trama multi-azimutal, caso 1

En este tipo de trama se monitorearon 2 CVU (1.a y 1.b), el caso 1.a es 2°C más cálido (39.5 vs. 37.5°C) en comparación al caso 1.b, durante el periodo de 3 a 8 p.m. Situación que se puede explicar debido a que en el caso más cálido (1.a) el ángulo azimutal ($Az=272^\circ$) de un segmento de calle permite que la radiación solar de la tarde incida sin bloqueos sobre las superficies. Siendo coincidente con el rango horario donde el valor de la radiación total recibida sobre el plano horizontal es mayor (3.44MJ/m²). Este factor contribuye a sobrecalentar las superficies expuestas. Caso contrario sucede en la calle 1.b, donde su forma se quiebra más sesgada del recorrido solar ($Az=236^\circ$), por lo cual el valor de radiación recibido disminuye a 2.87MJ/m² debido al rango horario donde ingresa la radiación en el canal. Los datos de radiación recibida y coordenadas solares fueron calculados con el programa Geosol v2.0. Durante el periodo de enfriamiento (8 p.m – 8 a.m), la temperatura mínima del aire en ambos esquemas es similar, $\Delta T_{1.b-1.a}^\circ = -0.3^\circ\text{C}$ (1.b=23.5 vs. 1.a=23.3°C). Este comportamiento se debe a que las posibilidades de enfriamiento de tipo radiativo y convectivo, en ambos esquemas, son similares $SVF_{1.a}=0.69$ y $SVF_{1.b}=0.60$. La temperatura promedio en ambos casos es semejante $\Delta T_{1.b-1.a}^\circ = -0.3^\circ\text{C}$, no

así la amplitud térmica donde el $\Delta T^{\circ}_{1.b-1.a} = -2.3^{\circ}\text{C}$, siendo el caso más cálido (1.a), el que posee mayor oscilación entre temperatura máxima y mínima.

Tabla 4. Comportamiento térmico de cada caso del día 15/01/2014.



b. Trama discontinua, caso 2

En este barrio se monitoreó un CVU, el comportamiento de este caso muestra que es una de las configuraciones más cálidas, alcanzando una máxima de 40.8°C durante el periodo de 5 a 6 p.m. La temperatura mínima registrada es de 24.1°C y tiene ocurrencia en el rango entre las 6 y 7 a.m. La amplitud térmica es de 16.7°C, la cual estaría vinculada al valor de SVF= 0.57, de manera tal que en el CVU las posibilidades de enfriamiento radiativo y convectivo durante la noche son posibles.

c. Trama rectangular, caso 3

En este tipo de trama se monitorearon 4 CVUs (3.a, 3.b, 3.c y 3.d), en estos casos se observa que el caso 3.c de orientación E-O registra la temperatura máxima más elevada (42.6°C), en el rango entre las 5 a 7 p.m. Sin embargo, es el caso que menor temperatura mínima tiene (24.5°C), en el rango entre las 6 y 7 a.m. En este caso se ve como la radiación solar que ingresa durante el día (aumento de la T° máxima) es liberada durante la noche por intercambios radiativos y convectivos (SVF= 0.61). Los valores de temperatura máxima (37.9°C) y promedio (31.7°C) más frescos son los del caso 3.d. Donde la orientación es N-S y el SVF es igual a 0.46. Es decir, la combinación de edificación, forestación y orientación colaboran a sombrear por un periodo más prolongado las superficies horizontales expuestas, evitando así que se sobrecalienten, disminuyendo las temperaturas medias radiantes. Los casos 3.b y 3.a (orientados N-S) se encuentran entre los extremos, con SVF iguales a 0.35 y 0.27 respectivamente. Donde, el caso 3.a tiene una mayor temperatura máxima (40.0°C) en comparación

con el caso 3.b (38.6°C). En cuanto a sus temperaturas mínimas, los valores registrados no muestran grandes diferencias, $\Delta T^{\circ}_{3.b-3.a} = 0.1^{\circ}\text{C}$. En estos casos se observa como el bloqueo de la visión de cielo afecta a los intercambios radiativos y convectivos nocturnos, ver temperaturas mínimas del caso 3.c (24.5°C, SVF= 0.61) versus casos 3.b (25.4°C, SVF= 0.35) y 3.a (25.3°C, SVF= 0.27).

d. Trama reticular, caso 4

Por último, en este tipo de trama donde existen ambos esquemas urbanos (abierto-forestado y compacto-sin forestación); se observa que el valor máximo de temperatura en el esquema compacto (4.c) alcanza los 47.7°C, siendo 9.7°C más elevado que el esquema forestado más fresco (4.a) en esta trama, que alcanza los 38.0°C. Esta diferencia se debe, entre otras razones, al sobrecalentamiento de las superficies expuestas por la falta de elementos de sombreado, como son los forestales. Provocando que la temperatura media radiante aumente, tanto por la exposición directa a la radiación como por la falta de enfriamiento de tipo evaporativo, que generan los árboles en el caso forestado. Durante el periodo de enfriamiento, las temperaturas mínimas de los casos forestados (4.a y 4.b) varían 1.3°C, $T^{\circ}\text{mín.} = 25.1$ y 23.8°C respectivamente. El caso 4.b con SVF= 0.50 permite que las superficies se enfríen más durante la noche; a diferencia del caso 4.a donde SVF= 0.16. En este mismo periodo (enfriamiento), el caso 4.c registra la mayor temperatura mínima igual a 25.2°C a pesar de tener un SVF= 0.74. Los valores de temperatura promedio entre el caso forestado más fresco (4.a) y el más cálido (4.c) varían 2.3°C, siendo más fresco el esquema oasis (promedio 31.8°C) que el esquema compacto (promedio 34.1°C).

2. Comparación de los CVU más frescos y más cálidos dentro y entre cada trama

En esta etapa se diferenciaron y agruparon a los CVU de cada barrio según su comportamiento térmico dentro de 2 grupos: cálidos (1.a, 2, 3.c, 4.c) y frescos (1.b, 3.d, 4.a). El caso 2, único caso monitoreado de trama Cul-de-Sac, se incorpora en el grupo de los cálidos debido a que su comportamiento responde a las características y valores de este grupo. En la tabla 5 se indica el CVU monitoreado de cada uno de los casos como así también el grupo al cual pertenecen. Así mismo, se indica la diferencia térmica (ΔT°) entre el CVU más fresco (1.b) con los demás casos.

Tabla 5. Constrastación entre grupo de casos frescos y cálidos, y su diferencia entre los valores de temperatura máxima, mínima y promedio con el caso más fresco 1.b.

Casos	Frescos			Cálidos			
	1.b Multi-azimutal	3.d Rectangular	4.a Reticular	1.a Multi-azimutal	2 Cul-de-Sac	3.c Rectangular	4.c Reticular
Trama							
ΔT° Max. 1.b	-	+0.4	+0.5	+2.0	+3.3	+5.1	+10.2
ΔT° Min. 1.b	-	+1.5	+1.6	-0.3	+0.6	+1.0	+1.7
ΔT° Prom. 1.b	-	+0.1	+0.2	+0.3	+1.2	+1.3	+2.5

Ahora bien, si evaluamos comparativamente los descriptores e indicadores utilizados para caracterizar los CVU, entre el caso más fresco 1.b y el más cálido 4.c, se observa que la temperatura del aire es menor cuando la morfología urbana es de tipo abierta (1.b, 3.d, 4.a, 1.a, 2, 3.c), con mayor ancho y largo de calle, menor H/W y azimut (orientación del CVU) cercana al eje N-S. Es decir que la

combinación de CVUs abiertos (edificaciones bajas y separadas) con mucha masa de acumulación de los materiales de las edificaciones, contribuye a aumentar la inercia térmica. Este mecanismo permite acumular calor que será liberado por radiación y convección durante la noche, evitando así que se sobrecaliente la temperatura del aire durante el día.

La existencia de forestación es otro descriptor que contribuye a mantener más fresca la temperatura del aire, tanto por el efecto de sombra, evitando que se sobrecalienten durante el día las superficies expuestas, como por el proceso de evapotranspiración.

Por último, en cuanto a los porcentajes y tipos de coberturas se muestra que a menores áreas de suelo selladas y mayores áreas de suelo permeables la temperatura del aire es menor, grupo de casos con LCZ 6_b. Es decir que las superficies ajardinadas contribuyen a mantener la temperatura del aire más fresca. Por otro lado dentro de esta categoría, el aumento de la rugosidad se verifica como beneficioso para disminuir la temperatura del aire. Esto puede resultar confuso, ya que en general el aumento de la rugosidad en las ciudades es perjudicial para los intercambios de tipo convectivo, sin embargo en la ciudad de Mendoza, el aumento de rugosidad está asociado a una mayor intensidad de forestación cuyo efecto es positivo en términos de control solar e hidratación atmosférica.

Discusión

El trabajo diagnóstico permitió identificar que los barrios insertos en el esquema abierto-forestado (LCZ 6_b) tienen las temperaturas del aire más frescas en comparación al caso compacto-sin forestación (LCZ 3) durante el periodo de verano; y que la forma de trama denominada como multi-azimutal es la más fresca.

En Mendoza —ciudad de clima árido— para que las nuevas urbanizaciones de baja densidad posean canales viales anchos y forestados y existan áreas verdes, es necesario aumentar la superficie de suelo urbano. Este crecimiento va sellando de manera progresiva las escasas áreas irrigadas (zonas oasis) o de infiltración (zonas de pedemonte); produciendo que la delimitación entre el paisaje construido y el paisaje natural sea poco clara, lo que se traduce en una disminución de las superficies aptas para suelo agrícola. Por otro lado, las ciudades de esquemas compactos son más eficientes en términos de uso de suelo y redes de infraestructura (energía, agua, transporte) lo que se traduce en una reducción de la energía per cápita asociada a la construcción y mantenimiento (Steemers, 2003).

Pero, para la ciudad en estudio, el modelo compacto-sin forestación monitoreado representa a la configuración que imposibilitaría generar un bioclimatismo urbano. Ya que se mantiene siempre más cálido, desmejorando tanto las condiciones de habitabilidad exterior ΔT° máxima $+10.2^{\circ}\text{C}$, las posibilidades de enfriamiento ΔT° mínima $+1.7^{\circ}\text{C}$ —estrategia para mitigar la ICU— y aumenta el consumo de energía eléctrica para climatizar el interior de viviendas ΔT° promedio $+2.5^{\circ}\text{C}$.

Este trabajo busca promover a avanzar en el conocimiento de esquemas urbanos óptimos, que resulten energética y ambientalmente eficientes para asegurar el desarrollo urbano sustentable de ciudades de zonas áridas. Donde como fin, estos lineamientos, recomendaciones o consideraciones, puedan ser incorporados en los códigos de edificación urbanos permitiendo a proyectistas y planificadores seleccionar las alternativas morfológicas óptimas en los aspectos antes descriptos para este tipo de ciudades.

Bibliografía

- Alchapar, N. & Correa, E. (2015). Comparison the performance of different facade materials for reducing building cooling needs. Eco-efficient materials for mitigating building cooling needs, Woodhead Publishing. Cambridge, pp.155-194. ISBN :9781782423805.
- Al-Homoud, M.S. (1998). Variable-Base heating and cooling degree day data for 24 saudi arabian cities. ASHRAE transactions, 104(2), 320-330.
- Correa, E. N.; Pattini, A.; Córica, M. L.; Fornés, M.; Lesino, G. (2006). Software: PIXEL DE CIELO. Programa informático que calcula el factor de visión de cielo a partir del procesamiento de una imagen digital hemisférica. Número de registro CONICET: 07304
- Correa, E., de Rosa, C. & Lesino, G. (2008). Urban heat island effect on heating and cooling degree day's distribution in Mendoza's metropolitan area. Environmental costs, in: Sociedade Portuguesa de energia solar (SPES) (Ed.), Proceedings of the EUROSUN 2008. Curran associates, Inc. Red Hook, NY, USA, 2, 951-958.
- Correa, E., Ruiz, M.A. & Cantón M. A. (2010). Urban forest structure and thermal comfort in "oasis cities" of arid zones. Ambiente construído, Porto Alegre, 10, 4, 119-137.
- Ente Provincial de Regulación Eléctrica, EPRE (2014). Informe técnico de evolución de la demanda de enero de 2014.
- Givoni, B. (1989). Urban design in different climates. World meteorological organization, WMO/TD, 346.
- GEOSOL (versión 2.0) software (2002): Dpto. de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta. Obtenido de: <http://www.unsa.edu.ar/~alejo/geosol/>.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, INDEC (2010). Censo nacional de población, hogares y viviendas. Argentina. <http://www.censo2010.indec.gov.ar/>
- Lin, T. P., Matzarakis, A. & Hwand, R. L. (2010). Shading effect on long-term outdoor thermal comfort. Building and Environment, 45, 213-211.
- Marshall S. (2005). Streets and Patterns. Spon Press: London and New York. ISBN 0415317509.
- MultiSpec© (versión 9) software (2011): School of Electrical and Computer Engineering Purdue University. Obtenido de: <https://engineering.purdue.edu/~biehl/MultiSpec/>
- Odum, H. T. & Odum, E. C. (1980). Energy basis for man on nature. Mc Graw Hill inc. New York. ISBN 0070475113, 9780070475113.
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. Quarterly Journal Royal Meteorological Society 108, 45, 1-24.
- Oke, T. R. (2004). IOM Report No. 81, WMO/TD No. 1250: Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. WMO, Geneva.
- Ruiz, M. A., Sosa, M. B, Correa E. & Cantón M. A. (2015). Suitable configurations for forested urban canyons to mitigate the UHI in the city of Mendoza, Argentina. Urban Climate.
- Shashua-Bar, L. & Hoffman, M. E. (2003). Geometry and Orientation Aspects in Passive Cooling of Canyon Streets with Trees. Energy and Buildings 35, p. 61-68.

- Stemers, K. (2003). Energy and the City: Density, Buildings and Transport. *Energy and Buildings* 35, 3-14.
- Stewart, I. D. & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *B. Am. Meteorol. Soc.* 92, 1879-1900.
- Stocco S., Cantón M. A. & Correa E. (2013). Evaluación de las condiciones térmicas de verano y eficiencia ambiental de distintos diseños de plazas urbanas en Mendoza, Argentina. *Hábitat Sustentable*, 3, 2, 19-34.
- Wolman, A. (1965). The metabolism of cities. *Sci. Am.*, 213, 156-174.

Autores

María Belén Sosa. Arquitecta, Magíster en Arquitectura Sostenible y Eficiencia Energética, becaria doctoral de CONICET.

Erica Correa Cantaloube. Ingeniera Química, Doctora en Ciencias - Área Energías Renovables, Investigadora Independiente de CONICET y Profesora en UTN-FRM.

María Alicia Cantón. Arquitecta, DEA en Arquitectura, Investigadora Independiente de CONICET y Profesora en FAUD-Universidad de Mendoza.