

INFLUENCIA DE LA MORFOLOGÍA URBANA SOBRE LA HABITABILIDAD TÉRMICA EXTERIOR EN UNA CIUDAD DE CLIMA ÁRIDO.

INFLUENCE OF THE URBAN MORPHOLOGY OVER OUTDOOR THERMAL HABITABILITY IN A CITY WITH ARID CLIMATE.

MARÍA BELÉN SOSA CASTRO
Consejo Nacional de Investigaciones
Científicas y Técnicas (CONICET)-Instituto de Ambiente, Hábitat y
Energía (INAHE), Mendoza, Argentina
msoa@mendoza-conicet.gob.ar

ERICA NORMA CORREA CANTALOUBE
Consejo Nacional de Investigaciones
Científicas y Técnicas (CONICET)-Instituto de Ambiente, Hábitat y
Energía (INAHE), Mendoza, Argentina
ecorrea@mendoza-conicet.gob.ar

MARÍA ALICIA CANTÓN
Consejo Nacional de Investigaciones
Científicas y Técnicas (CONICET)-Instituto de Ambiente, Hábitat y
Energía (INAHE), Mendoza, Argentina
macanton@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN

El ambiente construido modifica, como se sabe, las variables climáticas que influyen en el balance energético del cuerpo humano, siendo el confort térmico uno de los factores que interviene en la habitabilidad del espacio. Este estudio analiza la interacción entre microclima y morfología urbana para determinar el grado de confort térmico de zonas de baja densidad en una ciudad de clima árido (Mendoza-Argentina). Para ello se seleccionaron, caracterizaron morfológicamente y forestalmente, y monitorearon micro-climáticamente siete canales viales urbanos (CVU) representativos insertos en diversas morfologías de tramas. El confort térmico se calculó mediante COMFA y las relaciones entre morfología y confort se cuantificaron a partir del índice Pearson. Los resultados revelan que el confort térmico en los CVU analizados varía entre un 70 y un 20%, manifestando que la combinación entre huella urbana, perfil y forestación determina la habitabilidad térmica. También se observa que, para una morfología de trama, los CVU muestran diferentes respuestas en cuanto a confort y enfriamiento nocturno. Ello ilustra, a su vez, cómo impactan las decisiones de diseño y planificación de los esquemas de urbanización al momento de definir qué estrategias priorizar en aras de alcanzar condiciones de habitabilidad térmica en ambientes urbanos de clima árido que contribuyan a su sustentabilidad.

Palabras clave

morfología urbana, confort térmico, ciudad árida.

ABSTRACT

It is known that the built environment modifies climatic variables that impacts on the human body energy balance. The thermal comfort is one of the factors that influence the outdoor habitability of the space. This study analyzes the interaction between micro-climate and urban morphology to determine the degree of thermal comfort of low-density areas in a city with arid climate (Mendoza-Argentina). For this purpose, seven representative urban canyons (UC) were morphologically and forestally characterized and micro-climatically monitored. The cases are inserted in different urban grid morphologies. The thermal comfort was calculated by COMFA, and the relationships between morphology and comfort were quantified using the Pearson index. The results show that the thermal comfort of the UC varies in a range between 70 to 20%. This shows that the combination between urban footprint, profile and forestation determines the thermal habitability. It is also observed that for same urban grid morphology, the UCs have different responses regarding outdoor comfort and night cooling. This highlights how the design and planning decisions of the urban schemes impacts for defining which strategies prioritize in order to achieve the sustainability of the built environment.

Keywords

urban morphology, thermal comfort, arid city.

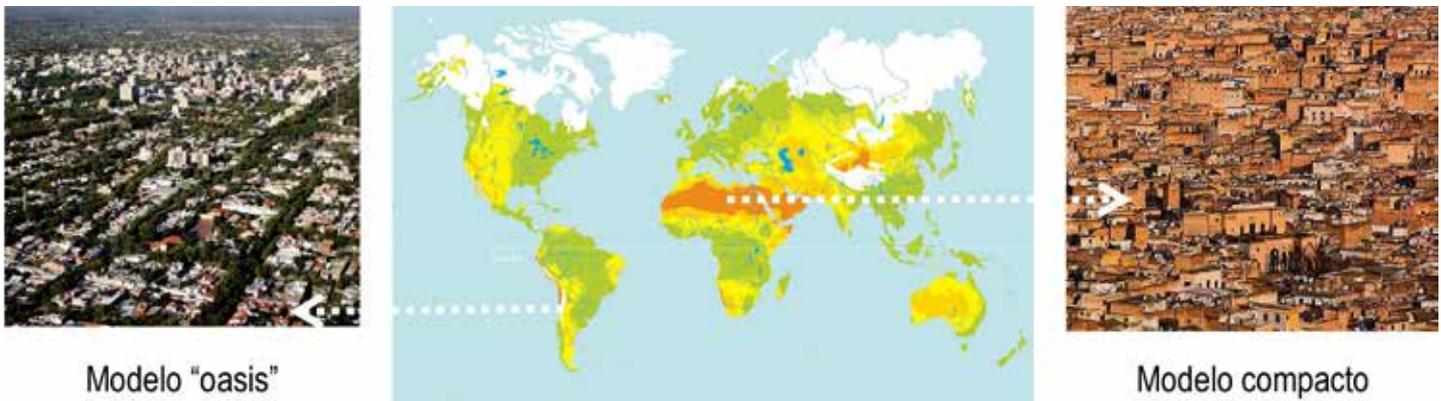


Figura 1. Mapa de zonas áridas, esquemas oasis y compacto. Fuente: Fotografías de Manuel Calleja y elaboración de autores.

INTRODUCCIÓN

El desafío de alcanzar la sustentabilidad del ambiente construido involucra el estudio del clima urbano (Tumini y Pérez, 2015; Higuera, 2012). Es consabido que el ambiente construido modifica las variables climáticas que influyen en el balance energético del cuerpo humano (Oke, 2004; Correa, de Rosa y Lesino, 2008). Estas modificaciones se perciben tanto en los espacios interiores como en los exteriores de la ciudad, siendo el confort térmico de las personas, en espacios exteriores, uno de los factores que más influye en la habitabilidad de los espacios públicos de las ciudades (Taleghani *et al.*, 2014; Nikolopoulou y Lykoudis, 2006).

Los estudios de Givoni (1989) muestran cómo la cantidad e intensidad de actividades que el individuo realiza son afectadas por el nivel de incomodidad térmica experimentado cuando se expone a las condiciones climáticas en espacios abiertos. En este contexto, diversas investigaciones plantean el desafío de diseñar espacios exteriores confortables que fortalezcan su uso e interacción en las ciudades y que, al mismo tiempo, disminuyan los efectos negativos derivados del cambio de albedo, de factores morfológicos o de la desaparición de áreas verdes que puede producir la urbanización (Perini y Magliocco, 2014; Tumini, 2013; Tornero, Pérez y Gómez Lopera, 2006). En este sentido, hay que considerar que la modificación microclimática que genera la existencia y desarrollo de las ciudades afecta las temperaturas urbanas, junto a otros factores. El conjunto de modificaciones se agrupa bajo el fenómeno de “isla de calor” (ICU) (Oke, 1982). Los efectos de la ICU, en ciudades con altas temperaturas durante el periodo estival, condicionan la habitabilidad térmica de los espacios exteriores como interiores, aumentan el consumo de energía y deterioran la calidad del aire.

El presente estudio se desarrolla en el Área Metropolitana de Mendoza (AMM), situada en el centro-oeste de Argentina (32°53' S, 68°51' O, 750 m.s.n.m.) y cuyo clima es de tipo árido. Las ciudades desarrolladas en este clima presentan 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 forestación es inexistente o escaso. Por otro lado, el modelo abierto —como es el área de estudio— tiene calles anchas y construcciones relativamente bajas, enmarcadas por un entramado de árboles que le han otorgado la denominación internacional de “ciudad oasis” (Bórmida, 1984). El objetivo de ambos modelos urbanos se basa en acondicionar ambientalmente un sector de desierto para el desarrollo de las actividades humanas. La Figura 1 muestra imágenes de ambos modelos urbanos.

Estudios desarrollados en el AMM por Correa (2006) han determinado la existencia de una ICU con magnitudes de hasta 10.6°C y aumentos de hasta un 20% en el consumo energético para acondicionamiento térmico de las edificaciones durante el verano. Asimismo, y dentro del AMM, (Ruiz, Correa y Cantón, 2012) y Stocco, Cantón y Correa (2015) han abordado el impacto que genera la ICU sobre la habitabilidad térmica de los espacios exteriores. Los resultados obtenidos han determinado que existe una incomodidad térmica generalizada debido al calor en canales viales con diversas configuraciones de forestación y morfologías de plazas (46 al 62% de desconfort en el caso de canales viales).

Mejorar las condiciones de habitabilidad de los espacios exteriores, desde el punto de vista térmico, demanda considerar todas las variables que participan del balance de energía del ambiente construido. En las ciudades, los canales viales urbanos (CVU), plazas y parques dan forma a los espacios abiertos exteriores. Particularmente, los CVU cubren más de un cuarto del total del área urbana (Shashua-Bar y Hoffman, 2003; UN-Hábitat, 2013), por lo tanto, su morfología, materialidad, orientación y esquema de forestación, determinan en gran medida el clima urbano (Lin, Matzarakis y Hwang, 2010; Alchapar, Correa y Cantón, 2015; Ruiz *et al.*, 2015; Sosa, Correa y Cantón, 2017).

La morfología del espacio exterior, en ciudades de tipo compactas insertas en zonas áridas, es una variable abordada

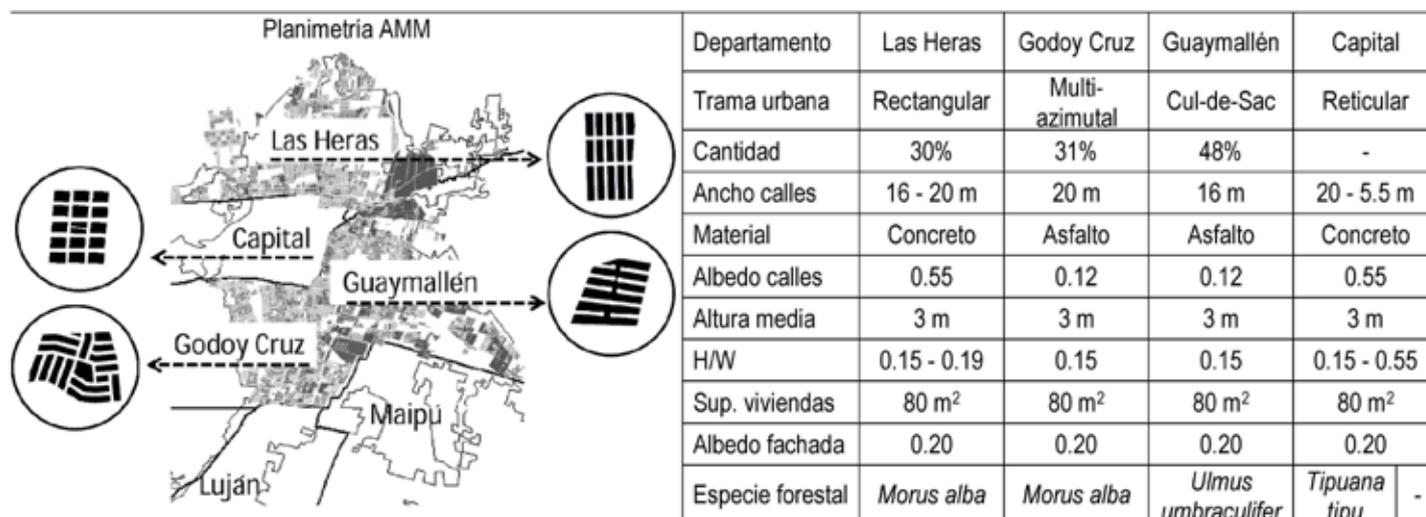


Figura 2. Valores de indicadores y descriptores de los 4 esquemas urbanos seleccionados. Fuente: Elaboración de los autores.

por numerosas investigaciones (Ratti, Raydan y Steemers, 2003; Shashua-Bar y Hoffman, 2003; Ali Toudert y Mayer, 2006; Johansson, 2006; Lin, Matzarakis y Hwang, 2010), siendo la relación H/W (relación alto-ancho del canal vial) una variable morfológica que demuestra estar directamente relacionada al grado de confort alcanzado. Sin embargo, los trabajos que analizan en profundidad cuáles variables morfológicas se relacionan en mayor medida con el grado de habitabilidad térmica en ciudades áridas de tipo "oasis" no son tan numerosos.

Con este panorama, el presente trabajo persigue analizar la interacción entre los parámetros micro-climáticos y las variables morfológicas que intervienen en el confort térmico de los espacios urbanos residenciales de zonas áridas, para identificar las morfologías urbanas que mejoren el grado de habitabilidad térmica exterior durante el verano; estación considerada como más demandante para ciudades con este tipo de clima.

METODOLOGÍA

CASOS DE ESTUDIO. SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN

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).

1. Macro-escala: Con el objetivo de delimitar el área de estudio, se seleccionaron los departamentos de mayor ocupación demográfica (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2010). Este análisis muestra que los departamentos con mayor ocupación son los 3 que limitan con la capital de la provincia: Guaymallén (16%), Las Heras (12%) y Godoy Cruz (11%). De igual modo, la capital de la

provincia (6%) se escogió por ser el departamento central del AMM.

2. Meso-escala: 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 tramas según morfologías de manzanas. Principalmente, se identificó 4 formas (damero, rectangular N-S y E-O e irregular) y, a partir de esa información, se designó 4 conjuntos urbanos (barrios) que son representativos dentro de cada departamento del AMM. Estos barrios, de uso residencial, difieren en cuanto a forma y orientación pero, al mismo tiempo, mantienen análogos aspectos morfológicos, constructivos y tecnológicos. Estas características facilitan la tarea de contrastar los CVU para determinar los mejores esquemas en términos de confort térmico exterior. Los resultados del relevamiento gráfico y las características de cada barrio se muestran en la Figura 2.
3. Micro-escala: Para seleccionar el sitio de monitoreo micro-climático, se buscó aquellos CVU que fueran representativos dentro de cada trama seleccionada. En la trama multi-azimutal, se seleccionó los 2 CVUs rectangulares que tienen leves cambios en su orientación, siendo el eje de mayor exposición E-O. En la trama Cul-de-Sac, se escogió 1 CVU con orientación E-O. En la trama rectangular, se optó por 2 CVUs con orientación N-S de distintos largos. Por último, en la trama reticular, se estableció el CVU que responde a la condición de atípica —compacta y sin forestación, caso 7— y también un CVU colindante típico —abierto y forestado, caso 6—. La Figura 3 muestra la ubicación de cada caso, dentro de las 4 tramas seleccionadas; como así también los valores de los descriptores e indicadores para caracterizar los 7 casos de estudio.

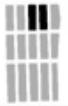
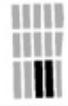
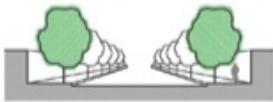
Caso	1	2	3	4	5	6	7
Trama urbana	Racional		Multi-azimutal		Cul de Sac	Reticular	
Planimetría							
Largo (m)	128	192	226	255	145	116	112
Ancho (m)	20	20	16	16	20	20	5.5
Superficie CVU	2560	3840	3616	4080	2900	2320	616
Altura media (m)	3	3	3	3	3	3	3
H/W	0.15	0.15	0.18	0.18	0.15	0.15	0.54
Perfil							
Orientación (°)	N-S	N-S	E-O	E-O	E-O	E-O	E-O
Superficie construida (m ²)	2492	3789	4809	5699	2945	3596	2326
Volumen construido (m ³)	7476	11367	14427	17097	8835	10788	6978
Compacidad (Vol. Construido/Sup. CVU)	3	3	4	4	3	5	11
SVF	 0.38	 0.35	 0.57	 0.56	 0.57	 0.23	 0.84
Nº de árboles (u)	44	53	52	53	36	31	0

Figura 3. Casos de estudio y valores de descriptores e indicadores de caracterización. Fuente: Elaboración de los autores

Los indicadores de superficie y volumen construido fueron calculados considerando las edificaciones que dan frente a la calle monitoreada. El indicador SVF fue calculado a partir de imágenes hemisféricas capturadas con una cámara digital Nikon® CoolPix, equipada con un lente ojo de pez, y procesadas con el software Pixel de Cielo (Correa, Ruiz y Cantón, 2010). 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 esta investigación.

CONFORT TÉRMICO EXTERIOR. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE ESTIMACIÓN.

A nivel mundial existen varios modelos que sirven para conocer y calcular el grado de confort térmico exterior (PET, PMV, UTCI). De modo particular, los trabajos de Correa, Ruiz y Cantón 2010; Ruiz, Correa y Cantón, 2012; Ruiz y Correa, 2015) contrastan diferentes modelos de confort térmico para identificar cuál de ellos es el más adecuado para ser utilizado en ciudades

forestadas de zonas áridas. En este sentido, los resultados de sus investigaciones han demostrado que la Fórmula de Confort (COMFA) desarrollada por Brown y Gillespie (1995), posibilita una mayor diferenciación de las características urbanas y forestales, en adición a las climáticas consideradas por los demás índices. Este método es de tipo deductivo y considera las siguientes variables para su cálculo:

- Climáticas: radiación global, radiación difusa, altitud solar, velocidad de viento.
- Micro-climáticas: temperatura del aire, humedad relativa, temperatura superficial vertical, temperatura superficial horizontal.
- Humanas: tasa metabólica, aislamiento de la ropa, permeabilidad ropa, temperatura de la piel, emisividad y albedo de la piel, albedo de la ropa.
- Forestales: permeabilidad y rugosidad.

La Eq. 1 muestra la fórmula del balance de energía COMFA:

$$S = M + R_{\text{absorbida}} - \text{Conv} - \text{Evap} - TR_{\text{emitida}} \quad (1)$$

Eq. (1)

Donde:

M: energía metabólica producida por el organismo; $R_{\text{absorbida}}$: radiación solar y terrestre absorbida; Conv: calor sensible perdido o ganado por convección; Evap: pérdida evaporativa de calor; TR_{emitida} : radiación terrestre emitida

Cuando el balance S es cercano a cero, puede esperarse que una persona se sienta térmicamente confortable. Si el balance presenta un gran valor positivo, la persona recibe más energía que la que pierde, por lo que podría haber sobrecalentamiento. Por otra parte, si el balance es negativo, la persona podría sentir frío. La Figura 4 muestra la sensación de confort humano relacionado con los valores del balance energético.

Balance (W/m ²)	Sensación
$S > -150$	La gente preferiría estar mucho más cálida
$-150 > S > -50$	La gente preferiría estar más cálida
$-50 > S > 50$	La gente preferiría no cambiar de estado
$50 > S > 150$	La gente preferiría estar más fresca
$150 < S$	La gente preferiría estar mucho más fresca

Figura 4. La sensación de confort humano relacionado con los valores del balance S. Fuente: Elaboración de los autores.

DATOS MICRO-CLIMÁTICOS. MONITOREO Y OBTENCIÓN.

El monitoreo en cada caso se realizó durante el periodo de verano de 2016 (22 de enero al 24 de febrero). La campaña de medición para adquirir los datos micro-climáticos se efectuó utilizando sensores fijos y mediciones móviles en cada CVU.

En las mediciones fijas se emplearon sensores del tipo H08-003-02 ubicados a una altura de 1,6 m desde el nivel de la calle (Oke, 2004), dentro de una caja perforada de PVC blanco, con el objetivo de evitar la irradiación y asegurar una adecuada circulación de aire. Las mediciones de temperatura y humedad relativa fueron programadas cada 15 minutos. Las mediciones móviles se realizaron en cada CVU durante un periodo diurno continuo de 10 horas (10:00 hasta las 20:00). En esta campaña se registraron cada 15 minutos las variables de: temperatura del aire, temperatura del punto de rocío, humedad relativa y absoluta, velocidad y dirección del viento y radiación solar, utilizando una estación del tipo HoboWeatherStation®, la cual fue instalada sobre un soporte móvil que permitió desplazarla a distintos puntos (se tomaron 4 en cada CVU). Simultáneamente, se registraron los valores de temperaturas superficiales (vertical-paredes y horizontal-calle y vereda) con un termómetro infrarrojo tipo Fluke 66. La Figura 5 exhibe una imagen de los equipamientos utilizados.



Figura 5. Fotografía del equipamiento utilizado. Fuente: Elaboración de los autores.

MORFOLOGÍA DE CANALES VIALES Y CONFORT EXTERIOR. RELACIÓN ENTRE VARIABLES.

Con el fin de detectar y cuantificar cuáles variables de la forma urbana muestran relación con el grado de confort exterior, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson (r). Los coeficientes de correlación son la expresión numérica que indica el grado de relación lineal existente entre 2 variables cuantitativas. El coeficiente de correlación r es un índice cuyos valores absolutos oscilan entre -1 y +1, su magnitud indica el grado de asociación entre las variables; el valor $r = 0$ indica que no existe relación entre las variables. Los valores ± 1 son indicadores de una correlación perfecta, siendo positiva al crecer o decrecer x , crece o decrece y , o negativa al crecer o decrecer x , decrece o crece y . En este estudio se considera una relación de magnitud de ± 0.5 , según corresponda, como significativa. La matriz de correlación se calculó mediante el uso del software InfoStat (Di Rienzo et al., 2011).

RESULTADOS

La Figura 6 muestra los resultados obtenidos del cálculo del balance de energía COMFA para cada hora, como también un gráfico de frecuencias con los porcentajes acumulados para cada caso. Los colores utilizados para diferenciar cada rango son los referenciados en la Figura 4. Al analizar los datos se visualiza que en todos los casos se alcanza el balance de energía para estar en confort térmico durante al menos 2 horas. Esto sucede en mayor medida durante el periodo de la mañana (10 a 13 h) y durante el periodo cercano al ocaso (18 a 20 h), horarios donde los valores de radiación solar son menores. El caso 7 (sin forestación) es el que muestra mayor cantidad de horas de incomodidad térmica por calor (11 a 19 h). Por otro lado, el caso 4 (forestado) es el que expresa mayor cantidad de horas de comodidad térmica durante 2 periodos diferentes (12 a 15 h y 18 a 20 h).

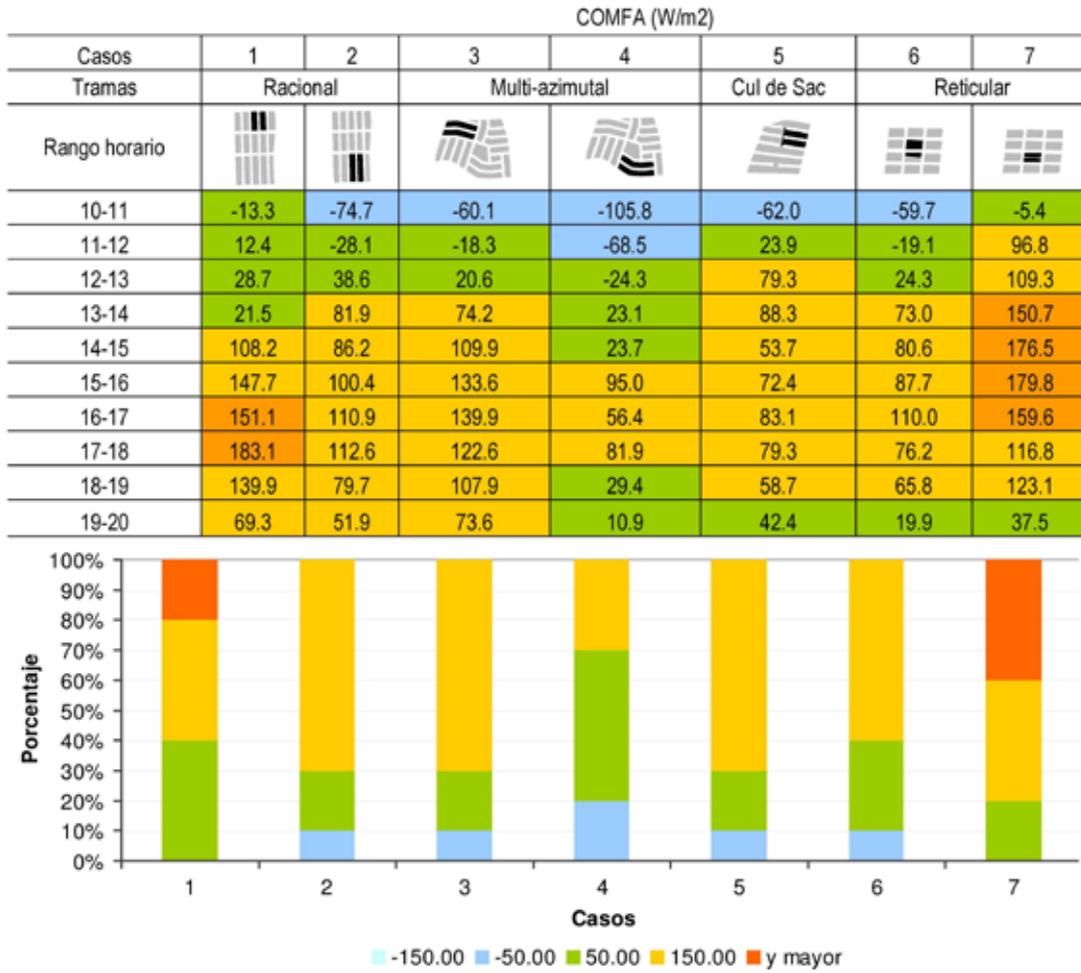


Figura 6. Valores y frecuencias del grado de confort para cada caso durante el periodo monitoreado. Fuente: Elaboración de los autores.

Caso	Horas	Convectivo (%)	Evaporativo (%)	R absorbida (%)	TR emitida (%)	Metabólico (%)
1	11-12	5	9	39	35	12
	16-17	1	5	44	38	12
2	11-12	7	11	38	33	11
	16-17	3	7	43	36	11
3	11-12	7	10	38	34	11
	16-17	2	6	43	37	12
4	11-12	8	11	36	34	11
	16-17	4	9	41	35	11
5	11-12	6	10	40	33	11
	16-17	2	7	41	38	12
6	11-12	5	9	38	36	11
	16-17	2	6	42	38	12
7	11-12	4	9	42	34	12
	16-17	2	6	44	36	12

Figura 7. Distribución porcentual de los flujos de energía que forman parte del modelo COMFA. Fuente: Elaboración de los autores.

Casos	1	2	3	4	5	6	7
Tramas	Racional		Multi-azimutal		Cul de Sac	Reticular	
							
T. máx. (°C)	36.8	35.8	36.9	35.7	38.0	35.8	38.3
T. mín. (°C)	27.8	27.1	23.4	24.8	26.0	27.5	27.9
T. prom. (°C)	32.5	31.9	30.2	30.6	31.6	31.6	32.8

Figura 8. Porcentajes de los términos del modelo COMFA. Fuente: Elaboración de los autores

Respecto a la distribución de frecuencias de las condiciones de confort a lo largo del periodo evaluado, se hace notar que:

- El caso 4 alcanza a acumular un 70% del total de horas monitoreadas en situación de confort térmico, seguido por el caso 1 y 6, con un 40%. Es decir que el caso 4, inserto en la trama de tipo multi-azimutal, consigue las mejores condiciones de habitabilidad térmica exterior.
- Del total de los casos evaluados, tres alcanzan un 30% del total de horas monitoreadas en situación de confort térmico, mientras que el caso 7 (compacto y sin forestación) solo alcanza un 20%.
- Los casos 4, 5, 6 y 7 exhiben los rangos de confort distribuidos durante el periodo de la mañana (10 - 15 h) y de la tarde (18 - 20 h); siendo el caso 4 el que evidencia mejores condiciones de habitabilidad, al concentrar el 50% de situación de confort durante la mañana.

La Figura 7 muestra la distribución porcentual de cada uno de los flujos de energía que forman parte del balance energético del modelo COMFA. Para el análisis comparativo, se seleccionó los valores correspondientes a un periodo matinal (11 a 12 horas) y a otro vespertino (16-17 horas). Al analizar los porcentajes se visualiza que el caso con mejores condiciones de confort (caso 4 - multi-azimutal), durante el periodo de mañana, presenta mayor pérdida de calor por transferencia convectiva (8%) y evaporativa (11%), y los menores valores de radiación absorbida (36%). En contraste y durante el mismo periodo, el caso con peores condiciones de confort (caso 7 - compacto sin forestación), presenta menor pérdida convectiva de calor (4%) y las mayores ganancias por radiación absorbida (42%). Durante el periodo vespertino, el caso 4 multi-azimutal mantiene mayores valores de pérdida por convección (4%) y evaporación (9%), como también los menores valores de radiación absorbida (41%) y emitida (35%). Y el caso compacto sin forestación mantiene, asimismo, los mayores rangos de radiación absorbida (44%).

Este análisis patentiza que si bien el grado de confort varía a lo largo del día en los canales analizados, aquellas formas de trama donde se inserta el canal vial y que propician la pérdida de calor sensible por convección y evaporación, a la vez que una menor absorción de radiación solar y re-emisión de radiación terrestre, son los que alcanzan mejores condiciones de confort.

Por otra parte, la Figura 8 indica los valores de temperaturas de aire máximas, mínimas y promedios de cada caso de

estudio. Al examinar los valores se visualiza que el caso con menor temperatura máxima (35.7°C) es el 4 y que la menor temperatura mínima y promedio se registra en el caso 3 (23.4°C - 30.2°C); ambos casos insertos en la trama multi-azimutal. Estos resultados concuerdan con estudios previos donde se indica que la temperatura máxima es uno de los factores que determina el grado de habitabilidad del espacio exterior; mientras que la temperatura mínima refleja las posibilidades de enfriamiento — considerada como una estrategia para reducir la ICU— y que la temperatura promedio se relaciona con el consumo energético para el acondicionamiento térmico de edificios mediante el concepto de los grados día de refrigeración y calefacción (Sosa, Correa y Cantón, 2016). En los 7 casos evaluados del área metropolitana de Mendoza, se observa que la variedad de morfologías de trama en la que se insertan los CVU no siempre logran alcanzar el mejor rendimiento en cuanto a habitabilidad, reducción de la ICU y consumo energético. Dicha situación constituye un condicionante que implica priorizar alguna de las estrategias al momento de planificar las áreas urbanas de baja densidad.

Por último, el análisis a partir de la matriz de correlaciones de Pearson muestra el grado de relación lineal que existe entre COMFA y la morfología de los CVU. Según indica la Tabla 1, durante el periodo entre las 11 a las 12 horas la relación estadística es de mayor significancia en relación al número de variables urbanas (largo, ancho, superficie CVU, H/W, superficie y volumen construido, compacidad, SVF y número de árboles). Así también, es en este rango horario donde 6 de los 7 casos se encuentran en equilibrio térmico.

El indicador H/W, utilizado en ciudades de tipo compactas, señala relación estadística positiva en el rango horario de 10 a 16 horas (periodo donde la altitud y radiación solar es mayor). De la misma manera, el número de árboles muestra significancia estadística durante el mismo rango horario, pero en este caso con signo negativo. Es decir, que a menor valor de H/W (calles más abiertas – H/W= 0.15) y mayor cantidad de árboles, el grado de habitabilidad térmica es superior (menor valor COMFA). Esto pone de manifiesto que, si bien ambos indicadores se relacionan con la respuesta COMFA, es la combinación entre la forma del perfil del CVU y la existencia de forestación urbana la que contribuye a mejorar la condición de confort térmico exterior.

Variables	Largo	Ancho	Sup. CVU	H/W	Sup. construida	Vol. construido	Compacidad	SVF	N° árboles
COMFA 10-11	-0.78	-	-0.83	0.58	-0.86	-0.86	0.53	-	-0.68
COMFA 11-12	-0.74	-0.64	-0.90	0.78	-0.84	-0.84	0.73	0.59	-0.88
COMFA 12-13	-0.69	-	-0.77	0.66	-0.81	-0.81	0.60	0.52	-0.79
COMFA 13-14	-	-0.66	-0.67	0.76	-	-	0.75	0.56	-0.78
COMFA 14-15	-0.54	-0.67	-0.77	0.76	-0.62	-0.62	0.72	-	-0.69
COMFA 15-16	-	-0.73	-0.61	0.74	-	-	0.68	0.54	-0.52
COMFA 16-17	-0.52	-	-0.62	-	-0.61	-0.61	-	-	-
COMFA 17-18	No hay correlaciones de significancia ($r \leq +/-0.5$)								
COMFA 18-19	-	-	-0.53	-	-0.63	-0.63	-	-	-
COMFA 19-20	No hay correlaciones de significancia ($r \leq +/-0.5$)								

Tabla 1. Valores de correlación Pearson entre los variables morfológicas y forestales y la respuesta COMFA horaria.
 Fuente: Elaboración de los autores.

Sin embargo, cuando se analiza la relación con el SVF, se ve que el valor de este indicador no es un factor determinante del grado de confort, ya que al comparar los casos 6 y 7 existe una diferencia de 30% en las condiciones de confort y de 0.33 en el valor de SVF (caso 6: SVF= 0.23, 40% del periodo en estado de confort; versus caso 7: SVF= 0.56, 70% del periodo en estado de confort). En otras palabras, aunque el bloqueo a la trayectoria solar, mediante forestación y edificación, ayuda a mejorar las condiciones de habitabilidad, existen otros factores que intervienen en el balance de energía, como es la masa e inercia térmica. Esto se refleja en los altos valores de correlación de los indicadores de volumen construido y compacidad en los rangos horarios donde se registran las máximas temperaturas (15 a 17 h). Ahora bien, es sorprendente que la orientación de la trama sea una variable que parece no estar directamente vinculada a la respuesta del balance COMFA en los casos analizados, dado que los casos 1 y 2 (orientados N-S) alcanzan menores e iguales rangos de confort que los casos orientados E-O.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los objetivos planteados en el estudio, se calculó el grado de confort térmico exterior de 7 canales viales insertos en diversas morfologías de tramas en una ciudad árida forestada. Los resultados de la investigación ponen en relevancia que las respuestas en cuanto a habitabilidad varían hasta en un 50% cuando se contrastan los comportamientos entre el caso abierto-forestado (caso 4) y el de tipo compacto-forestado (caso 7), y un 40% entre casos forestados (caso 4 versus casos 2, 3 y 5).

En términos morfológicos, la investigación detectó que la trama multi-azimutal (casos 3 y 4) consigue el mejor desempeño

tanto en confort exterior como en comportamiento térmico (temperaturas del aire máxima, mínima y promedio). No obstante, se observa que dentro de esta morfología de trama un mismo CVU no logra alcanzar el mejor rendimiento en cuanto a habitabilidad y enfriamiento nocturno. Ello se constata cuando se compara el caso 4 con mejor respuesta en cuanto a habitabilidad (ΔT° máxima $_{4-3} = -1.2^\circ\text{C}$), con el caso 3 con mejores posibilidades de enfriamiento (ΔT° mínima $_{4-3} = 1.4^\circ\text{C}$). Tales resultados manifiestan la importancia que tienen las decisiones de diseño y planificación de los esquemas de urbanización al momento de definir qué estrategias priorizar en las áreas residenciales de baja densidad.

De igual forma, el trabajo evidencia que el indicador H/W —utilizado en zonas áridas de esquemas compactos— no adquiere la misma relevancia para ciudades forestadas, ya que a iguales valores de este indicador las respuestas, en cuanto al grado de habitabilidad, varían ampliamente. De manera que se vuelve prioritario identificar y evaluar indicadores morfológicos que permitan predecir la respuesta en cuanto a habitabilidad térmica de acuerdo a las características de cada ciudad. En ese sentido, la matriz de correlaciones de Pearson determinó que existe un alto grado de relación lineal entre COMFA y variables morfológicas que incluyen la combinación de la huella urbana (superficie CVU, superficie y volumen construido, compacidad), el perfil (ancho, H/W) y la forestación (SVF y número de árboles) de los CVU.

Para finalizar, cabe indicar que aun cuando la labor realizada posee ciertas limitaciones en relación al número de casos evaluados, se plantea para una etapa futura ampliar la muestra (canales viales) con el propósito de evaluar, mediante técnicas estadísticas multivariadas, el impacto de las variables de caracterización utilizadas en otros esquemas urbanos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCHAPAR, Noelia; CORREA, Érica y CANTÓN, María Alicia. Classification of building materials used in the urban envelopes according to their capacity for mitigation of the urban heat island in semiarid zones. *E&B. Journal of Energy & Buildings*, UK. Cambridge, 2015, vol. 69, pp. 22-32.

ALI TOUDERT, Fazia y MAYER, Helmut. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment*, 2006, n°41, pp. 94-108.

BÓRMIDA, Eliana. Mendoza, modelo de ciudad oasis. *Revista SUMMA*, 1986, n° 226, pp. 68-72.

BROWN, Robert y GILLESPIE, Terry. *Microclimatic landscape Design: Creating thermal confort and energy efficiency*. New York: John Wiley and Sons, 1995.

CORREA, Érica; DE ROSA, Carlos y LESINO, Graciela. Urban heat island effect on heating and cooling degree days distribution in Mendoza's metropolitan area. Environmental costs. En: Sociedade Portuguesa de energia solar (SPES) (ed.), *Proceedings of the 1st international conference on solar heating, cooling and buildings (EUROSUN 2008)*. New York: Curran associates, Inc. Red, 951-958.

CORREA, Érica; RUIZ, María Angélica y CANTÓN, María Alicia. Morfología forestal y confort térmico en "ciudades oasis" de zonas áridas. *Ambiente construido*, 2010, vol. 10, n° 4, pp.119-137.

Di RIENZO, Julio; CASANOVES, Fernando; BALZARINI, Mónica; GONZÁLEZ, Laura; TABLADA, Margot y ROBLEDO, Walter. *InfoStat versión 2011*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 2011.

HIGUERAS, Esther. *Urbanismo bioclimático*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 2012.

GIVONI, Baruch. *Urban design in different climates*. World meteorological organization, 1989.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS Y CENSOS, INDEC. Censo nacional de población, hogares y viviendas (2010). Argentina. Disponible en: <http://www.censo2010.indec.gov.ar/>
JOHANSSON, Erik. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot and dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and Environment*, 2006, n° 41, pp. 1326-1338.

LIN, Tzu-Ping; MATZARAKIS, Andreas y HWANG, Ruey-Lung. Shading effect on long-term outdoor thermal comfort. *Building and Environment*, 2010, n°45, pp. 213-221.

NIKOLOPOULOU, Marianela y LYKOUUDIS, Spyros. Thermal comfort in outdoor urban spaces: analysis across different European countries. *Building and environment*, 2006, n°41, pp. 1455-1470.

OKE, Timothy. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, 1982, n° 108, pp. 1-24.

OKE, Timothy. *IOM Report No. 81, WMO/TD No. 1250: Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites*. Geneva: WMO, 2004.

PERINI, Katia y MAGLIOCCO, Adriano. Effects of vegetation,

urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2014, n° 13, pp. 495-506.

RATTI, Carlos; RAYDAN, Dana y STEEMERS, Koen. Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate. *Energy and Buildings*, 2003, n° 35, pp. 49-59.

RUIZ, Angélica y CORREA, Érica. Suitability of different comfort indices for the prediction of thermal conditions in tree-covered outdoor spaces in arid cities. *Theor.Appl. Climatol*, 2015, n°122, pp. 69-83.

RUIZ, Angélica; CORREA, Érica y CANTÓN, María Alicia. Función ambiental de parques urbanos en zonas áridas: clima y confort térmico. ENTAC, 2012 – XIV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Juiz de Fora, Brasil.

RUIZ, María Angélica; SOSA, María Belén; CORREA, Érica y CANTÓN, María Alicia. Suitable configurations for forested urban canyons to mitigate the UHI in the city of Mendoza, Argentina. *Urban Climate*, 2015, n° 14, pp. 197-212.

SHASHUA-BAR, Limor y HOFFMAN, Milo. Geometry and orientation aspects in passive cooling of canyon streets with trees. *Energy and Buildings*, 2003, n° 35, pp. 61-68.

SOSA, María Belén; CORREA, Érica y CANTÓN, María Alicia. Morfología urbana y comportamiento térmico de canales viales. Desarrollo de un modelo predictivo para temperaturas máximas. *Urbano*, 2016, n° 33, pp. 66-75.

SOSA, María Belén; CORREA, Érica y CANTÓN, María Alicia. Urban grid forms as a strategy for reducing heat island effects in arid cities. *Sustainable Cities and Society*, 2017, n° 32, pp. 547-556.

STOCCO, Susana; CANTÓN, María Alicia y CORREA, Érica. Design of urban green square in dry areas: Thermal performance and comfort. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, n° 14, pp. 323-335.

TALEGHANI, Mohammad; KLEEREKOPER, Laura; TENPIERIK, Martin y VAN DEN DOBBELSTEEN, Andy. Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. *Building and Environment*, 2015, n° 83, pp. 65-78.

TORNERO José, PÉREZ, Alejandro y GÓMEZ LOPERA, Francisco. Ciudad y confort ambiental: Estado de la cuestión y aportaciones recientes. *Cuadernos de Geografía*, 2006, n° 80, pp. 14-182.

TUMINI, Irina. *El microclima urbano en los espacios abiertos. Estudio de casos en Madrid*. Tesis doctoral inédita, Universidad Politécnica de Madrid, 2013.

TUMINI, Irina y PÉREZ, Alexis. Aplicación de los sistemas adaptativos para la evaluación del confort térmico en espacios abiertos, en Madrid. *Revista Hábitat Sustentable*, 2015, n° 5, pp. 55-67.

TUMINI, Irina. El microclima urbano en los espacios abiertos. Estudio de casos en Madrid. Tesis doctoral inédita, Universidad Politécnica de Madrid, 2013. UN-Hábitat Working Paper. *The relevance of street patterns and public space in urban areas*, 2013.