

Mitigación de la isla de calor urbana en ciudades de zonas áridas

Salvador Enrique Puliafito, Fabián Bochaca, David Allende

Universidad Tecnológica Nacional, Centro de Estudios para el Desarrollo Sustentable, (CEDS) Rodríguez 273, 5500 Mendoza, Argentina

epuliafito@frm.utn.edu.ar

Recibido el 5 de Abril de 2013, aprobado el 17 de Mayo de 2013

Resumen

A partir de mediciones meteorológicas fijas y móviles realizadas en la ciudad de Mendoza se mostró que los árboles y parques mejoran el confort térmico por efecto de la sombra y la evapotranspiración durante el día; pero al mismo tiempo, las calles arboladas retrasan el enfriamiento nocturno por retención de aire caliente debajo de sus copas. No obstante, el balance de confort térmico día-noche es favorable. La extensión del efecto de enfriamiento del parque se extiende hasta unos 800 a 1.000m 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.

PALABRAS CLAVE: ICU – PET - MEDICIONES MÓVILES - CONFORT CLIMÁTICO URBANO - ZONAS ÁRIDAS

Abstract

Fixed and mobile meteorological measurements performed in the city of Mendoza showed that trees and parks improve thermal comfort by shade and evapotranspiration during the day, but at the same time, trees delays night cooling by retaining hot air under their canopy. However, the balance of day-night thermal comfort is favorable. The cooling effect of parks extends up to 800 to 1000m, to the surroundings reaching an average temperature decrease of 1.3°C during the day and more than 4.0°C at night.

KEYWORDS: UHI - PET - MOBILE MEASUREMENTS - URBAN CLIMATIC COMFORT - ARID ZONES

Introducción

Los cambios económicos, sociales y espaciales en los centros urbanos han aumentado el área de superficies impermeables en detrimento de los parques y las zonas rurales. El calor antrópico producido por la industria y el transporte, la alta capacidad térmica de edificios y la obstrucción al flujo del viento ha modificado la inercia térmica de las ciudades. El aumento de la urbanización se asocia además a cambios en el uso y cobertura del suelo (CUCS), la contaminación del aire y una mayor demanda de consumo de energía y agua. Estos cambios han aumentado la diferencia de temperatura entre el medio urbano y el rural o periférico cuyo efecto se lo conoce como "isla de calor urbana" (ICU). Las unidades del paisaje urbano, tales como edificios, calles, árboles, jardines y parques interactúan de forma diferente con las capas atmosféricas adyacentes, tanto en escalas espaciales como temporales, en función de la exposición a la radiación solar, el intercambio neto de radiación de onda larga, y la ventilación. Los climatólogos reconocen dos capas diferentes de interacción (Oke, 1976, 1981, 1982; Grimmond et al., 1996; Arnfield, 2003): la capa de dosel urbana (CDU), que se extiende desde la superficie del suelo y alcanza el nivel de los techos de los edificios y la capa límite urbana (CLU), que es parte de la capa planetaria y se encuentra por encima de la CDU. El intercambio de energía a escala micro contra la formación de la CDU, mientras que los usos de la tierra y la meteorología regional afectan la CLU. En la escala horizontal se pueden identificar de tres zonas: i) la escala micro, que va desde la construcción individual, árbol o la calle hasta un tamaño de una cuadra de la ciudad (0 - 100m), ii) la escala local, se extiende desde varias cuerdas homogéneas a un barrio (200 - 2000m) y iii) la escala regional, que incluye la escala de la ciudad (5000 a 20000m). Estas escalas verticales y horizontales generan dos procesos diferentes: la ICU_CDU y la ICU_CLU.

Las principales causas de la aparición de ICU_CDU son: i) los cambios en el albedo de la superficie aumenta la absorción de la radiación de onda corta y reduce las pérdidas de radiación de onda larga, lo que lleva a un mayor almacenamiento de energía en los edificios y entornos construidos, ii) una menor turbulencia en cañones urbanos reduce la pérdida de calor sensible; iii) una mayor actividad antrópica pro-

duce calor adicional; iv) una menor vegetación reduce las tasas de evapotranspiración. La topografía, el tamaño de la ciudad, la velocidad del viento, la altura y cantidad de nubes, y la frecuencia de las capas de inversión influyen la magnitud de la ICU_CLU (Eliasson y Holmer, 1990). Otras causas adicionales pueden atribuirse a la creciente concentración de partículas de la contaminación urbana (Crutzen, 2004; Sarrat et al, 2006) lo que puede alterar el balance de energía de la atmósfera, y por lo tanto el aumento de la temperatura del aire local y la reducción de velocidades de enfriamiento (Abkari et al., 2001).

La principal diferencia entre ICU en zonas áridas o húmedas se refiere al tipo de suelo en la zona periurbana y rural: a) En las zonas húmedas, la periferia está vegetada, por lo tanto la temperatura está siempre por debajo de la temperatura de las zonas urbanas (día y noche). La ICU se intensifica durante la noche y en días de verano con vientos calmos. La mayor evapotranspiración de las zonas rurales, su menor almacenamiento de calor, la presencia de vientos más intensos provocan que la periferia a las zonas urbanas sean más frescas (Ackerman, 1987; Landsberg, 1981; Grimmond y Oke, 1999). b) En las zonas áridas (y más intensamente en la época de verano) la periferia (seca con poca vegetación xerófila) produce temperaturas mayores durante el mediodía por falta de humedad (menor regulación del calor latente) y falta de sombras. En las zonas urbanas la sombra de los edificios y la presencia de los árboles y parques producen un ambiente más favorable que las zonas periféricas áridas. En cambio, durante la noche la periferia se refresca más rápidamente que la zona urbana debido a una mayor tasa de enfriamiento evaporativo. Por lo tanto la ICU en las zonas áridas se manifiesta principalmente como un efecto nocturno. La presencia de una zona rural irrigada combina parte de los beneficios de una zona húmeda periférica en cuanto al refrescamiento por calor latente y aporte de aire más húmedo y fresco (calor sensible) (Brazel et al, 2000; Robaa, 2003; Pearlmutter et al, 2007).

El aumento de la ICU produce: a) exposición física elevada a elevadas temperaturas durante el mediodía; b) mayor vulnerabilidad a estrés térmico durante la noche (no alcanza a refrescar lo suficiente durante la noche); c) mayor desconfort o estrés térmico; d) aumento en la

demanda de energía (total o per cápita) para refrigeración; e) aumento en el consumo de agua potable. Desafortunadamente, el cambio climático global podría exacerbar estos efectos (con especial impacto en las ciudades de zonas áridas) por una mayor frecuencia de temperaturas máximas y mínimas elevadas y menores precipitaciones.

Existen muchos artículos sobre ICU basados principalmente en las ciudades del hemisferio norte, con un clima húmedo y templado (Oke, 1989; Taha, 1997). Arnfield (2003) y Mirzaei y Haghighat (2010) presentan una revisión amplia de los procesos físicos y técnicas de medición, mientras que (Roth, 2007) presenta una revisión de la extensa literatura de los estudios llevados a cabo en las ciudades tropicales y subtropicales. Sin embargo, relativamente pocos estudios se han llevado a cabo en ambientes áridos con la excepción de Phoenix, que lleva ya muchos años (Brazel et al., 2000; Guhathakurta y Gober, 2007; Chow y Brazel 2012, Chow et al, 2012). Otros estudios en entornos áridos se llevaron a cabo en Kuwait (Nasrallah et al, 2006), El Cairo (Robaa, 2003), Ouagadougou (Lindén, 2011), Eilat (Sofer y Potcher, 2006), Ciudad de México (Jáuregui, 1997; Oke et al., 1999), Mexicali (García-Cueto et al, 2003), Desierto de Negev (Pearlmutter et al, 2007) y Muscat (Charabi y Bakhit, 2011). Si bien estos trabajos se basan en las variaciones de temperatura urbano-rural, pocos estudios abordan el problema desde el confort térmico.

El propósito de este trabajo es contribuir a la investigación en ambientes áridos mediante el estudio de la influencia de la vegetación en el confort térmico en la ciudad de Mendoza, Argentina. Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo responder a las siguientes preguntas: i) ¿cuál es la variación temporal y espacial de la temperatura y la humedad en un ambiente árido con respecto a diversos tipos de suelos?, ii) ¿cómo pueden las áreas verdes mejorar el confort térmico urbano?, y iii) ¿hay diferencias entre la periferia rural seca e irrigada en el establecimiento de la ICU?

Parte Experimental

La investigación de campo se basa en el uso de datos meteorológicos superficiales proveniente de diversas fuentes: a) estaciones locales, b) mediciones móviles propias y c) mediciones es-

tacionarias propias dentro de diferentes copas de los árboles y superficies de césped con diferentes regimenes de riego. Adicionalmente, se calculó el confort térmico humano en diferentes momentos del día y para diferentes zonas de la ciudad usando el índice de Temperatura Fisiológica Equivalente (PET por sus siglas en inglés).

La combinación de mediciones móviles y estacionarias ha sido usada para estudiar los efectos de la ICU en ciudades húmedas y templadas: en Londres, Reino Unido (Chandler, 1962); en Chapell Hill, EE.UU. (Kopec, 1973); en Vancouver, Canadá (Richards, 2005) y en Salamanca, España (Alonso et al., 2003). En menor cantidad se han realizado mediciones en ambientes áridos: en Phoenix, EE.UU. (Brazel et al., 2000 y Chow y Brazel, 2012) y en Eilat, Israel (Sofer y Potcher, 2006).

El índice de confort térmico PET ha sido aplicado en diferentes ciudades y condiciones climáticas: Friburgo y Munich, Alemania, Atenas, Grecia y Albuquerque, EE.UU. (Matzarakis et al., 1999); Ezrum, Turquía (Toy y Yilmaz, 2010); Lisboa, Portugal (Andrade y Alcoforado, 2008); Fez, Marruecos (Johansson, 2006); Sydney, Australia (Spagnolo y de Dear, 2003). También se han llevado a cabo estudios bioclimáticos regionales o nacionales usando el índice PET, por ejemplo, en Argentina (Helbig et al., 2007) y en Hungría (Gulyás y Matzarakis, 2007).

Área de estudio

La ciudad de Mendoza, (32 S, 68 W, altura: 750 m sobre el nivel del mar) es un centro urbano, con aproximadamente un millón de habitantes, ubicada en una zona árida al este de la cordillera de los Andes en el oeste de Argentina. La superficie construida tiene una extensión en la dirección predominante norte-sur al pie de la cordillera de los Andes. La humedad relativa es baja (<50%), con días mayormente soleados y pocas incidencias de niebla. Las tasas de precipitación son bajas (<280 mm/año) principalmente durante los meses del verano austral (diciembre a febrero). La intensidad media del viento es baja (<2 m/s), con una fuerte influencia de los días de calma (26%) (Figura 1). Los vientos dominantes siguen una variación día-noche que se caracteriza por una típica circulación valle-montaña: el calentamiento solar en el lado del valle provoca un flujo de viento suave en la pendiente durante el día (ENE tra-

vés SE), mientras que por la noche, debido al rápido enfriamiento radiativo en el valle, la circulación se invierte haciendo que las masas de aire se mueven de la montaña al valle del S y SW (Schlink et al, 1999; Puliafito et al, 2003).

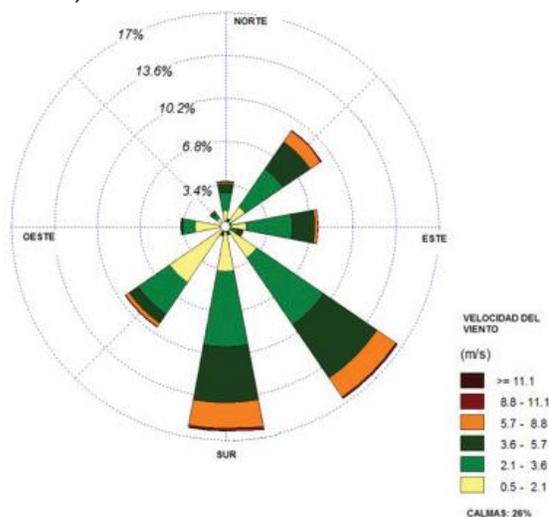


Fig. 1. Rosa de vientos para Mendoza (Aeropuerto). Promedio anual

Los árboles se clasifican en primera y segunda magnitud, en función de su altura, ancho de copa y robustez. Según el censo de bosques de Mendoza (Martínez-Carretero, 2010), el área metropolitana urbana está cubierta con cerca de 650.000 árboles, las principales especies son: *Morus alba* (422.500 árboles), *Platanus hispanica / acerifolia* (97.500 árboles) y *Fraxinus sp* (pennsylvanica y Excelsior), 130.000 árboles), todas las cuales proporcionan sombra a lo largo de las calles, aceras y fachadas de edificios. En el borde occidental de la ciudad, bordeando el pedemonte, hay un extenso parque, (Parque San Martín), que abarca alrededor de 350 hectáreas. Otros par-

ques y plazas más pequeños están distribuidos por toda la ciudad. Otras descripciones del medio ambiente en la ciudad de Mendoza se pueden encontrar en Correa et al. (2008), Martínez et al. (2006) y Arboit et al. (2008).

Mediciones Urbanas

Se midieron temperatura (T) y humedad relativa (RH) del aire usando: i) las estaciones meteorológicas locales, ii) mediciones móviles y iii) otras mediciones fijas en diferentes tipos de vegetación. Con el fin de evaluar el aporte local de la vegetación (es decir, la evapotranspiración) para el contenido de vapor de agua, se calculó la presión de vapor de agua (E, medida en hPa).

1) Datos *meteorológicos locales*: Se usaron cuatro estaciones meteorológicas que representan diferentes condiciones urbanas: el aeropuerto (AP), ubicado en el noreste, Luján-INTA (LI), ubicado en la periferia sur, el Parque San Martín (PQ) en el oeste, y Benegas (BN) en una zona residencial del sur (Figura 2). La estación PQ y AP (OMM # 87418 y # 87420 respectivamente) son estaciones meteorológicas operadas por el Servicio Meteorológico Nacional Argentino (SMN). Estos registran temperatura, humedad relativa, presión, heliofanía y dirección del viento y la intensidad en cada hora. LI es una estación automática (iMetosII) operado por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) que mide temperatura, humedad relativa, radiación solar, y la intensidad del viento. BN tiene una estación automática Davis y Thies operado por la Universidad de Mendoza para la investigación registrando temperatura, presión, humedad relativa y datos de viento.

Puntos PM	Uso del suelo	Descripción
1 - 3	Periferia irrigada (sur)	Área residencial de baja densidad
4 - 7	Pedemonte (suroeste)	Escasa vegetación
8 - 10, 14 - 15	Parque San Martín (oeste)	Parque irrigado vegetación densa
11 - 13	Pedemonte (oeste)	Escasa vegetación, nueva urbanización
16 - 23	Centro urbano	Densidad urban alta / árboles grandes
24 - 29	Centro urbano	Densidad urban media / árboles medianos
30 - 33	Parque Lateral Este	Parque sobre acceso principal
34 - 36	Área industrial (este)	Área industrial de baja densidad.
37 - 39	Autopista (sureste)	Zona agrícola, autopista
40 - 44	Periferia irrigada (sur)	Agricultura con riego

Tabla 1. Descripción de los puntos móviles de mediciones (PM)

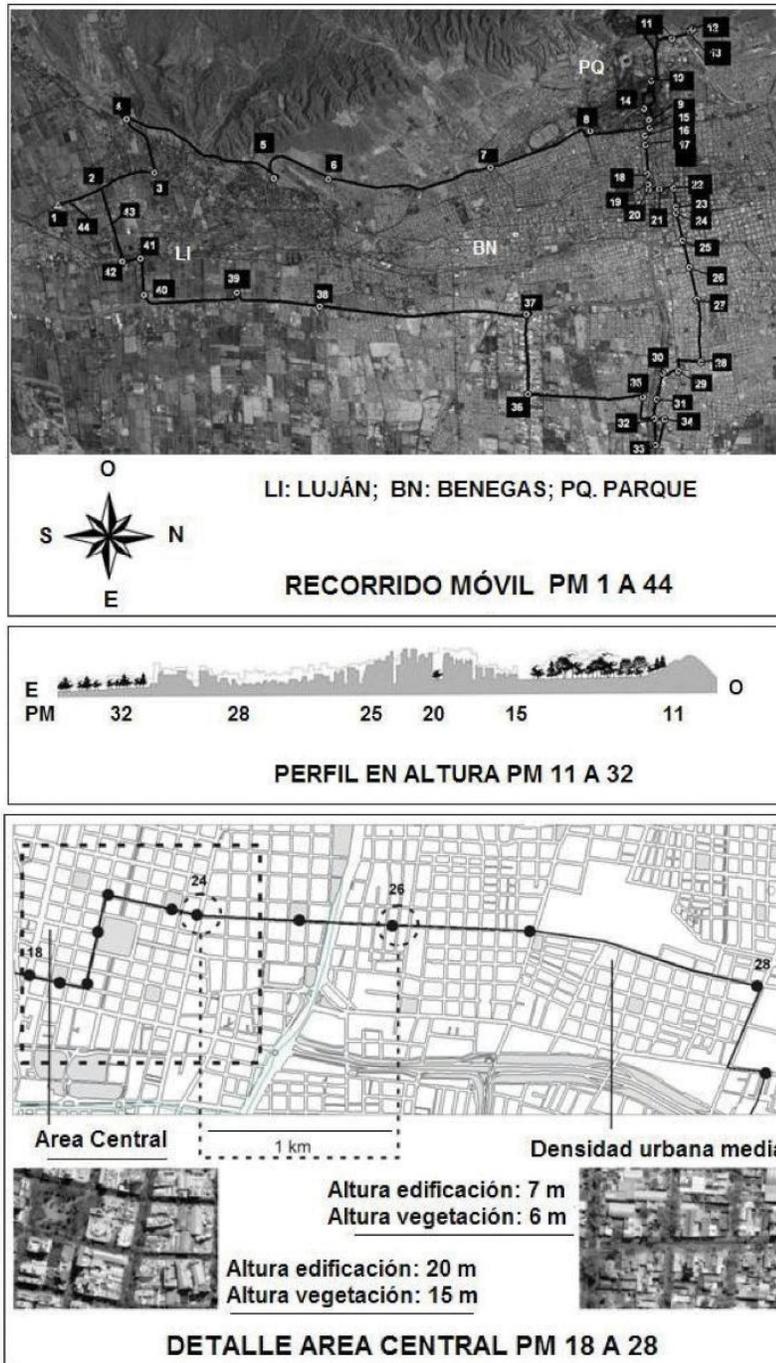


Fig. 2. Ubicación de los puntos de mediciones en la ciudad de Mendoza, Argentina **Panel superior: Recorrido móvil. Panel intermedio: perfil de aproximado de la ciudad en un corte O-E entre los puntos 11 y 32. Panel inferior: detalle de construcción y altura de vegetación en la zona céntrica.**

2) *Mediciones móviles*: Se midió T y RH en 44 puntos de medición (PM #) en un circuito continuo a través de la Ciudad de Mendoza (Figura 2) usando una estación micro meteorológica automática Davis en el techo de un vehículo (Figura 3). El vehículo se detuvo durante unos minutos en cada PM. Se realizó

esta medición durante tres períodos diferentes del día con regímenes estables de temperatura: por la mañana temprano, comenzando antes de la salida del sol a las 5:30 hora local; a la tarde, comenzando a las 15:30hs., y en la noche, justo después de la puesta del sol a las 20:30hs. Cada circuito tuvo una extensión

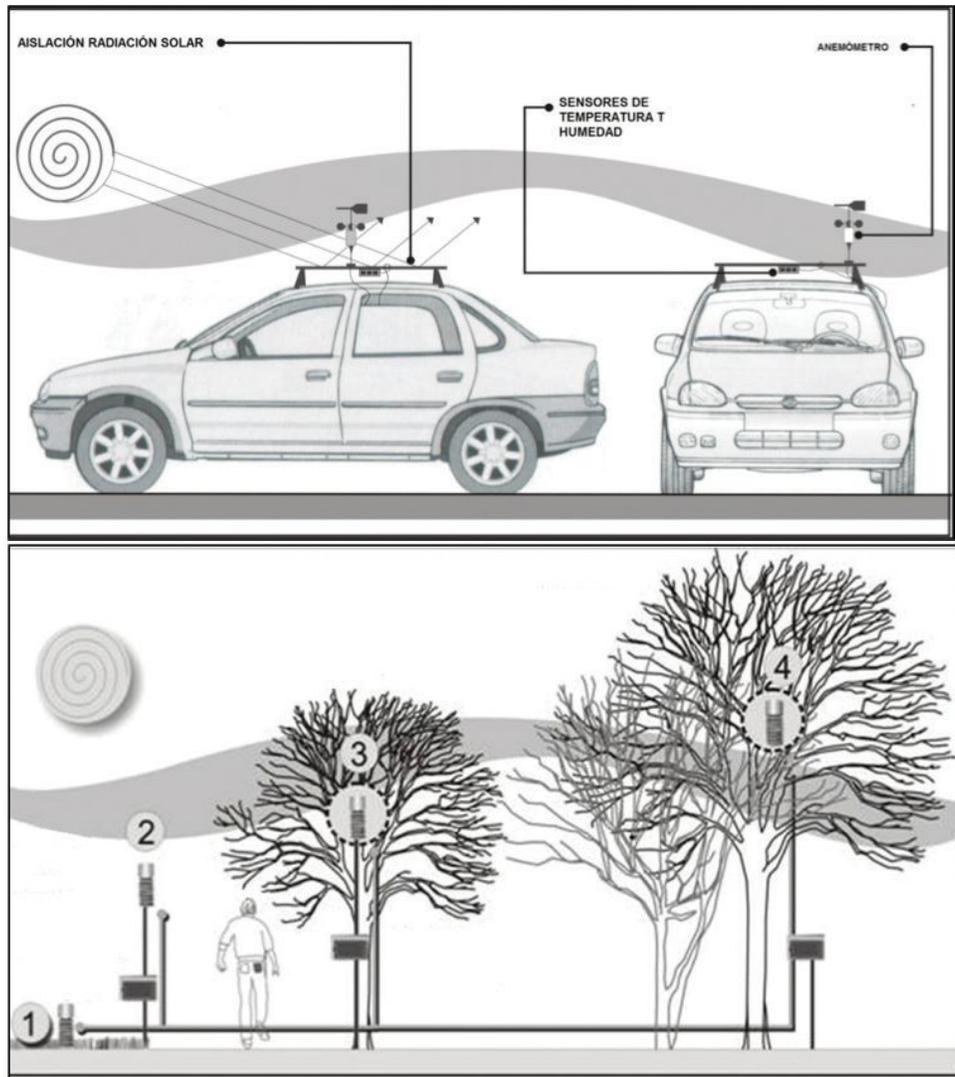


Fig. 3. Esquema de las mediciones. Panel superior: equipo móvil. Panel inferior: mediciones en vegetación: (1) Césped a 40cm, (2) Ambiente a 1,5m; (3) Prunus a 2m; (4) Tilia a 4m de altura respectivamente.

de 80 kilómetros y duró aproximadamente 2 horas. Éste consistió en dos tramos en dirección Norte-Sur y dos tramos de Este a Oeste, comenzando y terminando en el mismo punto en la periferia suroeste (PM # 1 = PM # 44).

Todos los datos fueron recogidos durante los veranos australes de 2004 (enero y febrero) y 2005 (diciembre de 2004, enero y febrero de 2005). Se seleccionaron 15 mediciones completas, en condiciones de cielo despejado durante los tres circuitos diarios. Esta poligonal incluyó todos los tipos de uso de la tierra dentro de la ciudad y su periferia: espacios abiertos, zonas agrícolas rurales con riego artificial (en su mayoría viñedos), zonas re-

sidenciales, zonas semiáridas (pedemonte de flora xerofítica natural), parques urbanos y calles con árboles de primera y segunda magnitud. La Tabla 1 describe las características de cada punto de medición de acuerdo con el tipo de uso de la tierra y el tipo de vegetación existente.

3) **Mediciones fijas:** La estación Benegas (BN) se encuentra en una zona verde de 1,6 hectáreas situada en un sector urbano residencial que se caracteriza por una altura media de construcción de 7m. El objetivo de esta medición fue determinar los cambios de clima en la micro escala inducidos por la vegetación de diferentes especies durante el verano austral

2003-2004. Se utilizaron cuatro conjuntos de instrumentos para capturar la temperatura a diferentes alturas y tipos de vegetación (Figura 3). Cada equipo contaba con dos sensores de temperatura (T^{\downarrow} y T^{\uparrow}) y un sensor de humedad (RH). Los instrumentos se distribuyeron de la siguiente manera: 1) Prunus: se midieron T^{\downarrow} y RH a una altura de 2m en la copa de un *Prunus pisardi* y T^{\uparrow} debajo del Prunus a 5cm de altura sobre una hierba mixta parcialmente sombreada y superficie de suelo desnudo; 2) Tilia: se midieron T^{\downarrow} y RH a una altura de copa de 4m en un *Tilia europea* y T^{\uparrow} encima de la superficie del suelo sombreado a 5cm de altura; 3) Césped: instalado en una superficie de césped (*Cynodon dactylon*, raigrás perenne) no sombreada a 40cm de altura (T^{\downarrow} y RH) y T^{\uparrow} en una plataforma de cemento 4m x 4m a 5cm de altura; 4) Referencia: lo constituye la estación meteorológica BN (T^{\downarrow} y RH) en un nivel estándar de 1,5m de altura en un espacio abierto con sensor adicional T^{\uparrow} instalado en una superficie de césped no sombreada a 5cm de altura.

El confort térmico

Para determinar el confort térmico, podrían utilizarse las pequeñas variaciones micro climáticas de la temperatura del aire y la humedad. Sin embargo, otros factores importantes con mayor variabilidad espacial y temporal también afectan el confort humano, como el factor de visión del cielo, el viento y el intercambio de flujos radiativos (Andrade y Alcorado, 2008). Estos factores se incluyen en la estimación del índice PET (Hoppe, 1999). En el presente estudio se usa este índice para comparar el estrés por calor y el confort térmico humano en áreas de parques, zonas rurales abiertas y calles urbanas con diferentes copas de los árboles y diferentes tipos de sombras. Se calculó el índice PET ($^{\circ}\text{C}$), usando la versión 1.2 del software de Rayman (Matzarakis et al., 1999), que calcula la cantidad de calor que un humano podría recibir cuando se expone a la radiación del sol, en comparación con la misma persona bajo condiciones de sombra o dentro de un edificio. Los rangos de los valores de PET para diferentes condiciones térmicas dependen de la producción interna de calor asumido y la resistencia térmica de la ropa (Matzarakis y Mayer, 1997).

Resultados

Mediciones móviles

La Figura 4 muestra las mediciones de la temperatura del aire (T , 4a), la presión parcial de vapor (E , 4b) y PET (4c) en función del punto del recorrido, durante tres períodos del día diferentes: por la Tarde (MT), por la Noche (MN) y por la Madrugada (MM). La Tabla 2 resume la información capturada por las mediciones móviles mediante la agrupación de los puntos de medición (PM#) en función de las características locales de uso del suelo. Esta tabla muestra las diferencias promedio entre el entorno urbano construido como el centro y zonas industriales (PM#: 16-29, 34-36) con los entornos no construidos, tal como parques urbanos y zonas verdes (PM#: 8-10, 14-15, 30-33); periferia seca (PM#: 4-7, 11-13) y periferia cultivada con riego (PM#: 1-3, 38-44).

Mediciones de la Tarde (MT): La temperatura del aire y los valores de PET estaban en su máximo valor diario (Tabla 2 y Figura 4a). La T media del aire y la humedad relativa en el ambiente construido fueron, respectivamente, $1,6^{\circ}\text{C}$ más alta y $1,4\%$ menor que en la periferia rural irrigada. Aunque la humedad relativa en el área urbana fue ligeramente inferior, las temperaturas más altas del centro produjeron un Exceso de Humedad Urbana (EHU) de $0,6$ hPa (Figura 4b), T en el parque fue en promedio de $1,2^{\circ}\text{C}$ más bajas que en el centro de la ciudad, pero sólo $0,4^{\circ}\text{C}$ más baja en las inmediaciones del parque (Figura 5), T en el pedemonte seco fue de $1,2^{\circ}\text{C}$ más alta que las zonas rurales con riego. Los valores de PET (Figura 4c) mostraron una percepción de temperatura "muy caliente" ($> 41^{\circ}\text{C}$) en todos los ambientes (urbano, colinas secas o áreas cultivadas / verde). El parque y zonas residenciales presentaron valores de PET de al menos 4°C más bajas que los de la periferia. En contraste, las mediciones realizadas bajo la radiación directa del sol presentaron valores de PET más altas que sus alrededores (PM#: 16, 25-29, 34-40).

Medición de la Noche (MN): Para este recorrido no había ningún tipo de radiación solar directa sobre las superficies de la zona urbana, aunque la temperatura del aire todavía era muy caliente. Se observó una marcada diferencia en la temperatura y humedad ambiental

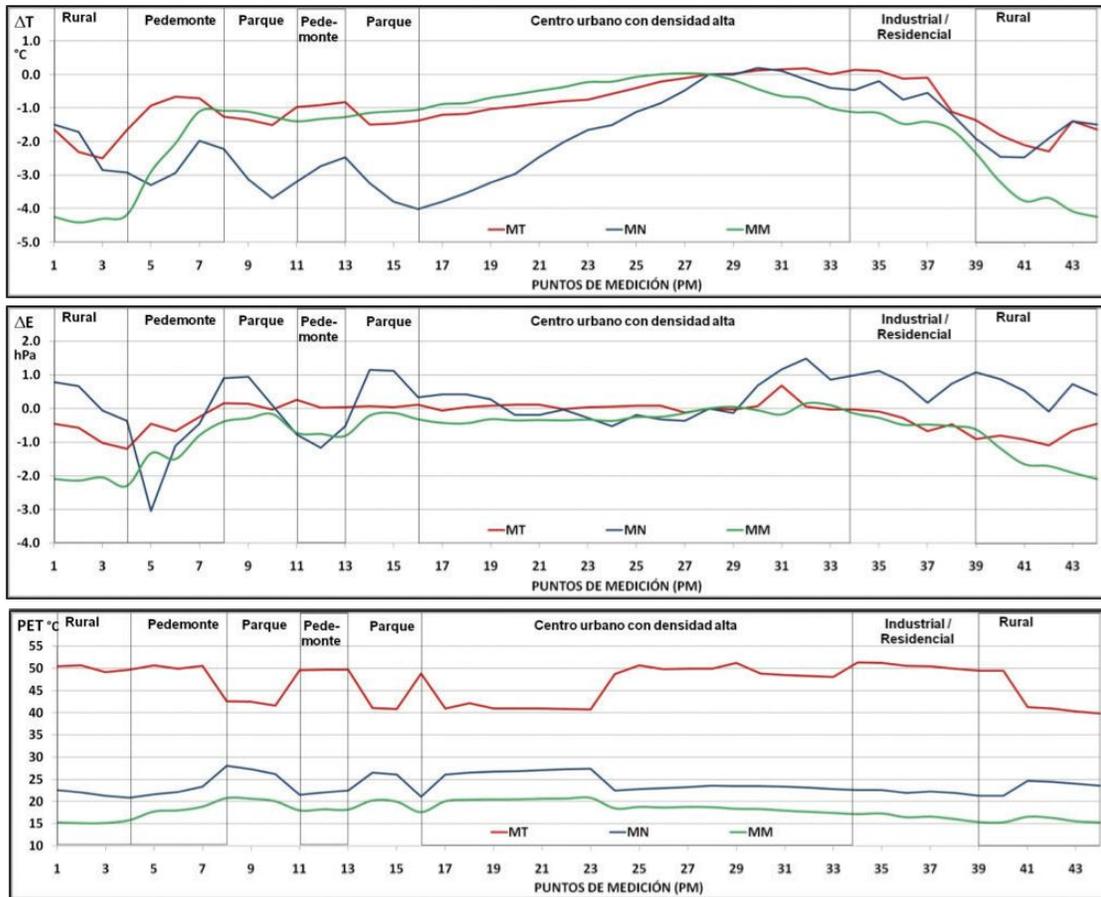


Fig. 4. Mediciones móviles. Panel superior (a): diferencias de temperaturas entre las mediciones en cada punto y el punto MP28. Panel intermedio (b): diferencias de presión de vapor de agua entre cada punto y el punto MP28. Panel inferior (c): valores absolutos de la temperatura fisiológica equivalente PET.

entre las áreas verdes y rurales húmedas y la periferia seca: los parques y las zonas rurales de riego mostraron $E > 15 \text{ hPa}$, mientras que en las zonas secas $E < 14 \text{ hPa}$ (Figura 4b). Las temperaturas del aire en las zonas cercanas al pedemonte y los barrios ubicados cerca de los parques eran más frescos que el entorno urbano construido. El aire en el centro de la ciudad era más seco que los parques y las zonas rurales irrigadas, pero más húmedo que el pedemonte (periferia seca) con un exceso de humedad urbana (EHU) (Kuttler et al, 2007; Holmer y Eliasson, 1999) promedio de $1,4 \text{ hPa}$ (Tabla 2). Las áreas de secano fueron $4,3\%$ ($1,2 \text{ hPa}$) más secas que la periferia rural irrigada. El índice PET alcanzaba los valores de confort ($18\text{-}23^\circ\text{C}$) en el pedemonte (suroeste) y en el llano hacia el noreste de la ciudad.

Medición de la madrugada (MM): La temperatura a la salida del sol tenía un valor mínimo promedio de $17,0^\circ\text{C}$ en la periferia y de

$20,3^\circ\text{C}$ en el centro. Debido a las temperaturas de aire más frescas en este momento del día, la RH fue mayor, oscilando entre 60% y 70% . Las diferencias en la Tabla 2 muestran que el centro de la ciudad fue un $10,5\%$ ($0,9 \text{ hPa}$) más seco y $3,6^\circ\text{C}$ más caliente que las superficies rurales irrigadas, mostrando la ICU más alta del día (Tabla 2). La circulación valle-montaña, durante esas horas de la madrugada, era del SW al NE, haciendo fluir lentamente (2 m/s) de aire fresco y seco hacia la ciudad. El índice PET (Figura 4c) durante este recorrido mostró valores frescos y bajos en la periferia y de confort aceptables en las áreas del centro. Las zonas verdes mostraron valores ligeramente más altos de PET ya que fueron tomadas por debajo de la copa de los árboles. Se observó la misma situación en la primera parte de la zona del centro (PM#: 16-23) con edificios altos y árboles de primera magnitud a lo largo de las calles. Por el contrario, la segunda parte de la zona del

centro (PM#: 24-29) al tener edificación más baja y árboles más espaciados y de segunda magnitud tuvo valores de PET menores. A pesar de estas diferencias, antes de la salida del sol, toda el área de estudio presentó valores aceptables de confort térmico. En este punto del día el calor sensible del día anterior ya fue eliminado de los diferentes tipos de superficies, dejando sólo las condiciones regionales típicas de verano.

Las estaciones meteorológicas y las mediciones de superficie

La Tabla 3 presenta los valores medios de temperatura y presión de vapor medidos en las estaciones de AP, PQ, LI durante los meses de ve-

rano de 2006 a través de 2010 y BN durante los meses de verano de 2003 y 2004. Los valores de AP se consideran representativos de la periferia seca norte no cultivada (llano) mientras que los datos de LI representan las condiciones meteorológicas de las zonas periféricas rurales irrigadas; los datos PQ representan las zonas verdes urbanas. Las diferencias de temperatura media del aire de verano mostraron que AP fue de 3,1°C más caliente que LI y 1,4°C más caliente que PQ. Los valores diferenciales de humedad relativa mostraron que la periferia rural (AP y LI) fue en promedio un 6% más seco que las áreas del parque. Lo que produce un exceso de humedad 3,4hPa con respecto a la periferia irrigada al Sur (LI).

RECORRIDO	TEMP (°C)			RH (%)			E (hPa)			PET (°C)		
	MM	MT	MN	MM	MT	MN	MM	MT	MN	MM	MT	MN
PROMEDIO	19,0	27,7	27,7	62,5	36,2	38,6	13,7	13,5	14,3	18,0	46,7	23,7
Urbano (U)	20,0	28,2	28,2	60,4	35,6	37,1	14,1	13,7	14,2	18,9	47,9	24,3
Parques (P)	19,6	27,8	27,5	62,8	37,0	41,1	14,3	13,8	15,0	19,3	43,3	25,5
Periferia irrigada (I)	16,5	26,7	27,7	66,6	37,0	39,1	12,5	13,0	14,5	15,6	45,3	23,2
Periferia seca (S)	19,1	27,8	26,9	60,9	36,2	37,4	13,5	13,6	13,3	18,2	46,8	22,6
DIFERENCIAS												
U-P	0,5	0,4	0,7	-2,3	-1,4	-4,0	-0,1	-0,2	-0,9	-0,4	4,6	-1,2
U-I	3,6	1,6	0,5	-6,2	-1,4	-2,0	1,7	0,7	-0,3	3,3	2,6	1,1
U-S	0,9	0,4	1,3	-0,5	-0,6	-0,3	0,6	0,1	0,9	0,7	1,1	1,7
I-S	-2,7	-1,2	0,8	5,7	0,8	1,7	-1,0	-0,6	1,2	-2,6	-1,5	0,6

Tabla 2. Promedio de las mediciones móviles

Recorridos (Hora local): MM: Madrugada (5:30-7:30); MT: Tarde (15:30-17:30 pm); MN: Noche (20:30-22:30). Variables: TEMP: temperatura, RH: humedad relativa, E: presión parcial de vapor de agua y PET: temperatura fisiológica equivalente.

VAR.	TEMP (°C)			RH (%)			E (hPa)		
	06:00	15:00	21:00	06:00	15:00	21:00	06:00	15:00	21:00
AP	19,8	29,7	26,8	62,8	34,1	45,0	14,5	13,9	15,6
BN	16,8	29,3	22,5	66,9	37,2	51,8	13,1	14,8	13,6
PQ	19,1	27,8	24,8	64,2	42,0	51,6	14,0	15,7	15,9
LI	16,9	26,2	23,9	63,4	35,3	42,0	12,2	12,0	12,4
PROM.	18,2	28,3	24,5	64,3	37,2	47,6	13,4	14,1	14,4
DIF.									
AP-BN	3,0	0,4	4,3	-4,1	-3,1	-6,8	1,4	-0,9	2,0
AP-PQ	0,7	1,9	2,0	-1,4	-8,0	-6,7	0,5	-1,8	-0,3
AP-LI	2,9	3,5	2,9	-0,7	-1,3	3,0	2,2	1,9	3,2

Tabla 3. Promedio estival de las estaciones meteorológicas fijas

Sitios: PQ: Parque San Martín (zona verde); AP: Aeropuerto (zona seca); LI: Luján (zona cultivada); BN: Benegas (residencial, césped irrigado). Periodo: Enero, Febrero y Diciembre de los siguientes años: PQ (2001-2010); AP (2001-2010); LI (2006-2010) y BN (1997-2004).

ID	Altura (m)	T (°C)			E (hPa)		
		Prom.	Desv. Est.	Rango	Prom.	Desv. Est.	Rango
BN	1,5	23,5	5,3	29,0	13,5	3,5	20,4
PRUNUS	2	24,0	5,3	29,6	15,1	3,8	21,3
TILIA	4	23,7	4,8	25,8	15,1	3,8	20,6
CESPED	0,4	21,8	5,7	32,6	17	4,1	24,2
SUPERF.							
SOLEADO	0,05	23,4	8,1	40,6			
SOMBRA	0,05	24,6	6,0	33,6			
CEMENTO	0,05	26,0	6,5	33,8			

Tabla 4. Promedio de mediciones sobre distintos tipos de vegetación

Período: Diciembre 2003, Enero - Febrero 2004 en Benegas (BN). Tipo de vegetación: PRUNUS a 2m en el interior de la copa de un *Prunus Pissardi*; TILIA: a 4m en el interior de la copa de un *Tilia Europea*; CÉSPED: sobre césped soleado a 40cm altura. Mediciones superficiales a 5cm de altura, solo temperatura: SOLEADO sobre césped sin sombras; SOMBRA: Suelo desnudo parcialmente sombreado; CEMENTO: Sobre una plataforma de cemento.

Al comparar la variación horaria de la temperatura del aire y las diferencias de humedad relativa entre dos estaciones, el aeropuerto (AP), ubicado en la periferia seca, fue de al menos 2°C más caliente que el parque (PQ) durante las horas de la tarde (15:00-17:00 hora local). Esta estación también fue 2% más seca que la periferia rural irrigada (LI) durante las primeras horas de la mañana (7-9 am), mientras que lo contrario ocurrió durante la noche (7 a 9 pm) (> 3% más húmeda).

La Tabla 4 resume la temperatura promedio en verano medida en diferentes tipos de superficies y bajo la sombra de las copas de los árboles. La amplitud térmica diaria obtenida dentro de la copa de los árboles a 4m fue la más pequeña de todas las mediciones (máx, $T_{TILIA4m}$: 35,3°C y mínima, $T_{TILIA4m}$: 9,5°C), con una amplitud térmica más de 3,2°C menor que la temperatura del aire circundante ambiente (T_{BN}).

Las mediciones en el interior de la copa de los árboles a 2m de altura ($T_{PRUNUS2m}$) produjeron resultados similares a los $T_{TILIA4m}$, pero con una amplitud térmica levemente mayor (Figura 5). Los valores de E para ambas copas de los árboles ($E_{TILIA4m}$ y $E_{PRUNUS2m}$) fueron 1,6hPa más que BN (E_{BN}) (Figura 6). Las mediciones de la temperatura superficial del suelo a una altura de 5 cm parcialmente bajo sombra ($T_{SOMBRA5cm}$) fueron en promedio de 24,6°C. Estas

mediciones fueron 1,2°C mayores a la temperatura del césped en condiciones de sol ($T_{SOLEADO5cm}$) y 1,4°C menores al de la superficie de cemento ($T_{CEMENTO5cm}$). Este sensor midió los valores más altos de temperatura (promedio 26°C). Es interesante observar la gran amplitud de temperatura y humedad medida sobre las superficies de césped expuestas a la radiación solar directa sin sombra ($T_{CESPED40cm}$) (Figura 5). A pesar de que su valor medio fue cercano de los valores ambientales BN, mostró valores máximos muy altos al mediodía, pero valores muy bajos durante la noche, comparados con los de suelo desnudo y superficies de cemento. Givoni y Saaroni (2003) también han informado de variaciones de temperatura similar en césped durante el verano en Tel Aviv, Israel.

La Figura 7 representa los promedios horarios del índice PET para todo el período de verano en diferentes estaciones y condiciones de superficies. Podemos observar la similitud de parque y la copa de los árboles (curvas 7 y 2) y BN con el césped en 40cm (curvas 5 y 3) durante las horas del día, señalando la influencia del tipo de superficie tipo de cada área: la influencia de la sombra de árboles en los parques y césped con riego en BN.

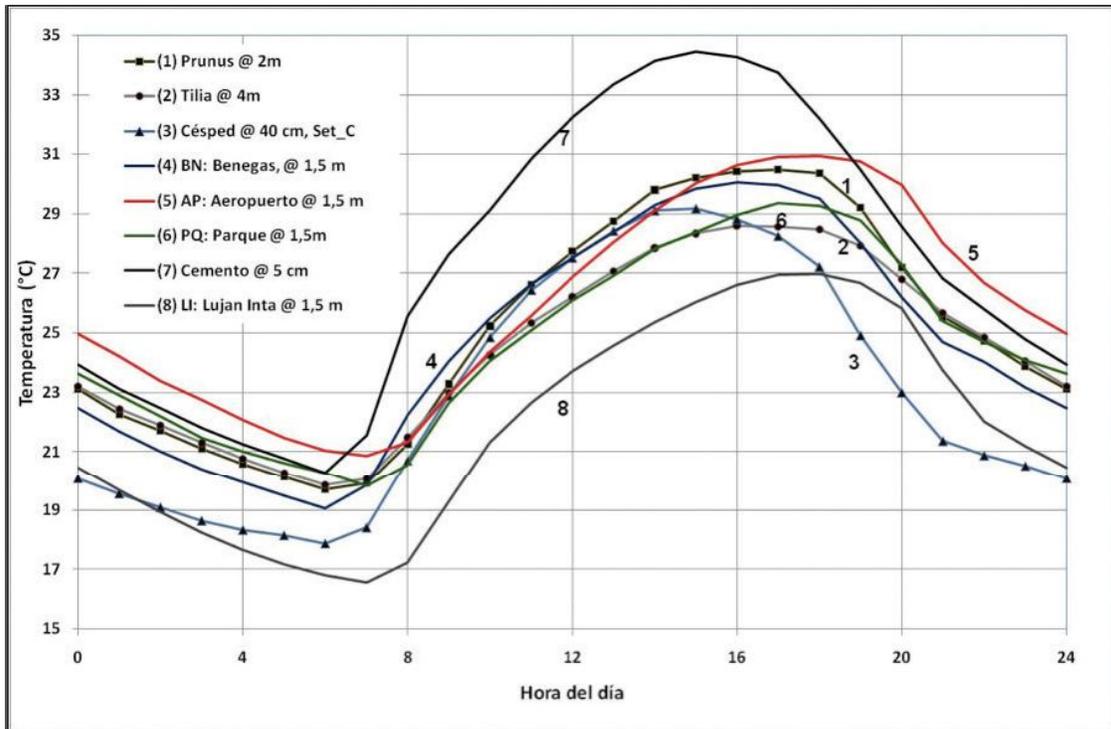


Fig. 5. Temperatura promedio en distintos tipos de vegetación y estaciones meteorológicas. (1) Prunus; (2) Tilia; (3) Césped; (4) Benegas; (5) Aeropuerto; (6) Parque; (7) Cemento; (8) Luján.

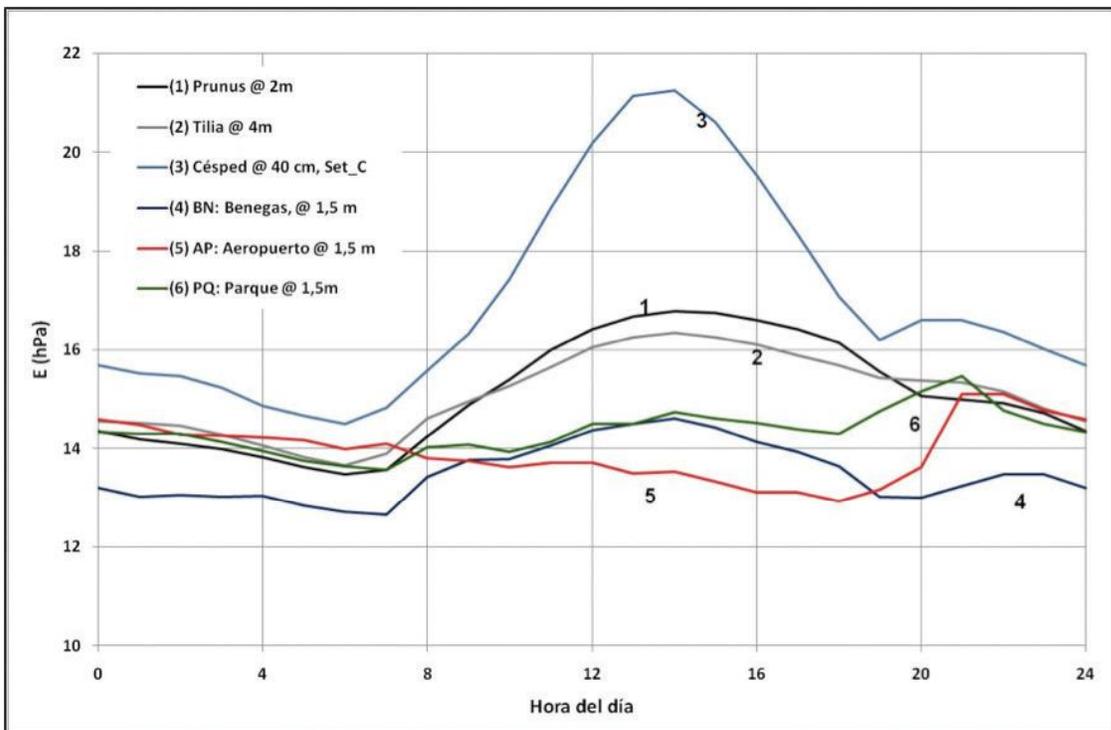


Fig. 6. Presión de vapor de agua E promedio para distintos tipos de vegetación y estaciones meteorológicas: (1) Prunus; (2) Tilia; (3) Césped; (4) Benegas; (5) Aeropuerto; (6) Parque.

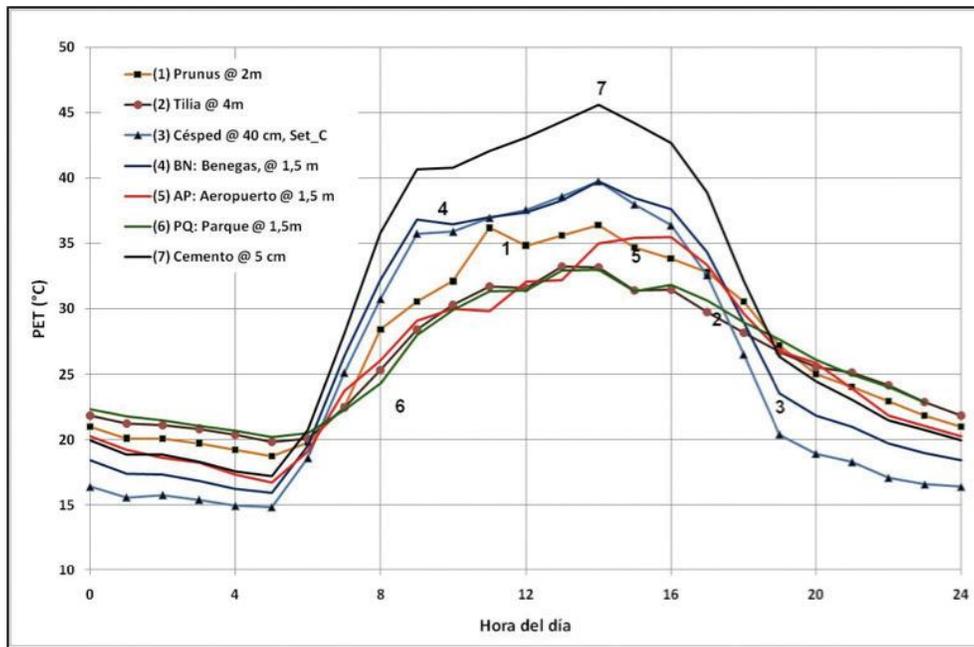


Fig. 7. Temperatura fisiológica equivalente promedio PET en distintos tipos de vegetación y estaciones meteorológicas: (1) Prunus; (2) Tilia; (3) Césped; (4) Benegas; (5) Aeropuerto; (6) Parque; (7) Cemento.

Discusión

Esta investigación micro meteorológica urbana incluyó una combinación de mediciones móviles y datos meteorológicos estándar de estaciones meteorológicas locales, y mediciones dentro de diferentes copas de los árboles en la ciudad de Mendoza. El análisis de estas mediciones mostró que las áreas verdes contribuyen a regular la temperatura local aportando humedad a los ambientes áridos urbanos. Las zonas menos densas, como la periferia de la ciudad con jardines bien regados o áreas cultivadas tienen un mejor confort climático que el centro urbano. Sin embargo, es posible encontrar áreas dentro del centro de la ciudad con buenas condiciones climáticas, como por ejemplo cerca del Parque San Martín (PQ) y el Parque Lateral del Acceso Este.

Extensión e intensidad de los efectos de las áreas verdes

Usando las mediciones móviles fue posible observar la influencia de estos parques sobre sus alrededores, donde se pueden determinar tres sectores distintos. Tomando el límite Este del parque PQ como un punto de referencia,

se observó un aumento en la temperatura a medida que la distancia al parque aumentaba y se ingresa al centro de la ciudad, observando el típico efecto de ICU (Figura 8). Los cambios de temperatura (entre el parque y cada punto de medición móvil fueron pequeños en el primer sector, hasta una distancia de 450m hacia el Este del parque, que se puede interpretar como una influencia directa del aire fresco del parque fluyendo hacia sus alrededores. Este efecto se extiende en todo el límite Este del parque y también a más de 500 a 700m hacia el Sur.

Un segundo sector, entre 450-1200m hacia el Este del parque, que corresponde a una zona residencial, se detectaron diferencias de temperatura de aire de aproximadamente $0,5^{\circ}\text{C}$ ($>$ PQ), lo que indica un efecto mixto de influencias del parque y la sombra densa de los árboles de primera magnitud existentes en las orillas de las calles (PM#: 18-22 en la Figura 3 corresponde a una zona del centro urbano, con árboles de copa alta y frondosa). Continuando más hacia el este en el centro de la ciudad y en comparación con PQ, la diferencia de temperatura del aire en el tercer sector se incrementó hasta $1,3^{\circ}\text{C}$ durante el día y $>$ $3,0^{\circ}\text{C}$ por la noche. Más allá de una distancia

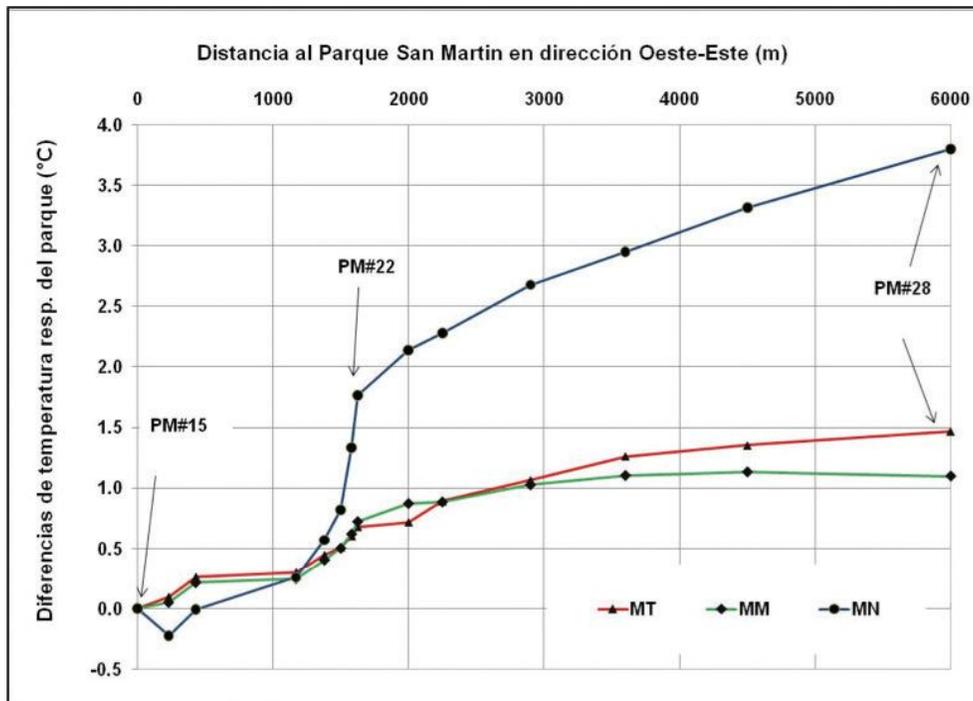


Fig. 8. Efecto de enfriamiento del parque. Diferencias de temperaturas entre las mediciones y parque (PM15). MT: Tarde; MM: Madrugada, MN: Noche. (Ver también Figura 1, panel superior)

de 2000m del parque la temperatura local ya no tiene influencia del parque, sino que depende del tipo construcción y tipo de árboles a lo largo de sus calles. Del mismo modo las mediciones móviles mostraron un refrescamiento de 200-300m en dirección norte-sur del parque lateral (al Acceso Este, que corre con dirección E-O) de hasta 1,2°C en la noche, dependiendo de la dirección del viento dominante. Esto coincide con estudios de Jáuregui, (1997); Spronken-Smith y Oke, (1998).

Confort térmico y aporte de los árboles

En verano, las temperaturas promedio del mediodía pueden alcanzar valores elevados produciendo estrés térmicos entre los habitantes. Los árboles de primera magnitud en los cañones urbanos proporcionan abundante sombra a lo largo de calles, caminos peatonales y superficies al pie del edificio, Evitan la radiación solar que alcanzaría la superficie, lo que reduce la temperatura del aire ambiente durante el día. Sin embargo, los árboles de primera y segunda magnitud reducen la velocidad del viento y retienen una parte del aire caliente por debajo de sus copas, por lo que el enfriamiento radiativo nocturno es más lento. Especialmente útil fue el cálculo del índice de

PET para determinar el confort térmico. Durante el mediodía el índice PET es menor en plazas, parques y veredas sombreadas que en las zonas urbanas bajo el sol o en la periferia. Esto se debe principalmente al efecto de la sombra y el aporte de evapotranspiración de los árboles. En las horas de la noche el índice PET nocturno fue mayor en las zonas de parque y centro en zonas con densidad de árboles, que en la periferia (seca o irrigada). Esto se debe a que las copas de los árboles reducen el enfriamiento radiativo nocturno por restricción de la circulación de los vientos y además mantienen parcialmente el aire caliente debajo de las copas de los árboles. Sin embargo, el balance de confort térmico de las áreas sombreadas y con árboles densos es favorable, ya que la reducción del estrés térmico durante las horas del mediodía, es mayor que la reducción de índice PET durante las horas de la noche.

El índice medio diario PET calculado sugiere además que bajo condiciones de sol durante el día de verano, los árboles grandes proporcionan una buena opción ecológica si las calles son más anchas que 20m (véase PM#: 18-22). En cambio los árboles de segunda magnitud ofrecen una sombra aceptable y re-

ducen parcialmente la radiación solar en superficies y fachadas de edificios, y la interceptación de viento de sus copas es más pequeño que los árboles más altos (véase PM#: 24-29) durante las horas nocturnas.

Evapotranspiración y superficies verdes

Las mediciones en distintas copas de árboles y superficies vegetadas en Benegas muestran el aporte de vapor de agua de los árboles al medio ambiente regulando la temperatura debido al calor latente absorbido por evapotranspiración. Cuando las superficies de césped en áreas verdes están sombreadas por medio de los árboles, se aumenta la diferencia de temperatura con las zonas construidas (tanto durante el día y por la noche), debido a la sombra y la evapotranspiración, (ver resultados similares en Hamada y Ohta, 2010; Potcher et al., 2008; Sashua-Bar et al., 2009). Durante las horas del mediodía la temperatura sobre el césped (sin sombra) puede ser mayor a la del entorno construido, lo que se traduce en un índice PET elevado. Estos valores son consecuencia de la falta de sombra, bajo albedo y un aumento de la absorción de la radiación de onda corta. Por la noche, sin embargo, ya que el césped no bloquea el flujo del viento y no tiene sombra de los árboles, el enfriamiento radiativo es muy eficiente, lo que lleva a la mínima temperatura del aire nocturno. Sin embargo el promedio diario (día y noche) de una superficie con césped (y riego) producen una temperatura menor a la ambiental en zonas construidas.

Acción del viento

Por último, a partir de los datos de las estaciones meteorológicas locales, esta investigación muestra la importancia del papel de los vientos nocturnos en el proceso de refrigeración urbana. Debido a los vientos nocturnos seco y fresco de las montañas áridas (del S-SW), y la inercia térmica más pequeña del ambiente seco en Mendoza, el efecto de enfriamiento nocturno comienza más temprano en el sur de la ciudad. Durante las primeras horas de la noche el viento proveniente del pedemonte sopla sobre la ciudad, empujando aire cálido y húmedo hacia el NE, arribando al aeropuerto, ubicado en un área seca y menos cultivada. Este fenómeno hace que el enfriamiento nocturno en AP se retrase 2-3 horas en comparación con el borde SW de la ciudad. Antes del amanecer toda la ciudad y

periferia alcanza valores nocturnos aceptables. Esto pone de manifiesto la influencia de los patrones de circulación de los vientos permanentes en la evolución espacio-temporal del efecto ICU.

Estas consideraciones tienen implicaciones directas para el confort térmico en el centro urbano. Por ejemplo, los desarrolladores urbanos de Mendoza están presionando al municipio para utilizar el pedemonte árido para nuevos usos residenciales y comerciales, La expansión de la ciudad hacia el oeste incrementará el efecto de ICU. Dicha construcción reduciría el flujo de viento proveniente del pedemonte, disminuyendo el efecto beneficioso del pedemonte y el parque sobre las áreas ya construidas.

También se puede señalar que los valores PET en el aeropuerto mostraron un régimen de confort térmico mejor que en el interior del parque durante las horas de la madrugada debido a que el aeropuerto se encuentra en un espacio abierto y por lo tanto tiene mayores intensidades de viento que el parque. Sin embargo, a una velocidad igual del viento durante el día, los valores de PET en el parque son al menos de 10°C más bajos que en el aeropuerto.

Conclusiones

En resumen, la interacción de los parques y calles arboladas en el ambiente árido urbano, como ocurre en la ciudad de Mendoza, muestra varias características: i) La diferencia de temperatura urbano-rural (ICU) es mayor de noche antes del amanecer que durante el día; ii) en las zonas áridas la temperatura en la periferia (seca y sin sombras) puede ser mayor que en las zonas construidas (con árboles o sombra de edificios); iii) la diferencia de temperatura urbano-rural es mayor respecto de la periferia irrigada (zona rural cultivada) que la periferia seca (pedemonte con escasa vegetación natural).

El efecto de enfriamiento de los árboles durante el día en verano, con elevada radiación solar, se debe a dos factores: a) a través de la sombra: los árboles reducen la radiación de onda larga en los edificios y el suelo, y b) a través de la evapotranspiración de la copa del árbol. El enfriamiento nocturno en la ciudad de Mendoza es también una combinación de dos procesos diferentes que actúa en dos escalas diferentes: a) regional, debido a la circulación valle-montaña,

y b) local, debido al rápido enfriamiento radiativo de las zonas descubiertas, especialmente debido a la inercia térmica más baja de las zonas agrícolas y pedemonte seco.

A través de la combinación del uso de la tierra y la circulación de los vientos, las condiciones de confort en la periferia de la ciudad y cerca

de los parques o áreas verdes (irrigadas) son mejores que en las áreas donde la densidad de construcción es mayor.

En las zonas áridas el consumo de agua para regadío de parques, plazas y zonas cultivadas es elevado, pudiendo comprometer la sostenibilidad de la ciudad.

Referencias

- ACKERMAN, B., (1987) Climatology of Chicago area urban-rural differences in humidity. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 26, 427–430.
- AKBARI, H.; POMERANTZ, M.; TAHA, H., (2001) Cool surfaces and shade trees reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70 (3), 295-310.
- ALONSO, M.; LABAJO, J.; FIDALGO, M., (2003) Characteristic of the urban heat island in the city of Salamanca, Spain, *Atmósfera*, 16, 137-148.
- ANDRADE, H.; ALCOFORADO, M., (2008) Microclimatic variation of thermal comfort in a district of Lisbon (Telheiras) at night. *Theor, Appl, Climatol.*, 92, 225–237.
- ARBOIT, M.; DIBLAS, A.; FERNÁNDEZ LLANO, J.; DE ROSA, C., (2008) Assessing the solar potential of low-density urban environments in Andean cities with desert climates: The case of the city of Mendoza, in Argentina. *Renewable Energy*, 33, 1733–1748.
- ARNFIELD, A., (2003) Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23, 1–26.
- BRAZEL, A.; SELOVER, N.; VOSE, R.; HEISLER, G., (2000) The tale of two climates – Baltimore and Phoenix urban LTER sites. *Climate Research*, 15, 123–135.
- CHANDLER, T., (1962) Temperature and humidity traverse across London, *Weather*, 17, 235-241.
- CHARABI, Y.; BAKHIT, A., (2011) Assessment of the canopy urban heat island of a coastal arid tropical city: The case of Muscat, Oman. *Atmospheric Research*, 101 (1-2), 215–227.
- CHOW, W.; BRAZEL, A., (2012) Assessing xeriscaping as a sustainable heat island mitigation approach for a desert city. *Building and Environment*, 47, 170-181.
- CHOW, W.; WINSTON, T.; BRENNAN, D.; BRAZEL, A., (2012) Urban Heat Island Research in Phoenix, Arizona: Theoretical Contributions and Policy Applications. *Bull. Amer. Meteor., Soc.*, 93, 517–530.
- CORREA, E.; MARTINEZ, C.; CANTÓN, A.; DE ROSA, C., (2008) Seasonal impact of building densities and urban tree configurations on the thermal conditions in urban canyons, The case of Mendoza metropolitan area in Argentina. PLEA 2008 – 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture.
- CRUTZEN, P., (2004) New Directions: The growing urban heat and pollution ‘island’ effect; impact on chemistry and climate, *Atmospheric Environment*, 38 (21), 3539-3540,
- ELIASSON, I.; HOLMER, B., (1990) Urban Heat Island Circulation in Göteborg, Sweden. *Theor. Appl. Climatol.* 42, 187- 196.
- GARCIA-CUETO, R.; JAUREGUI, E.; TEJEDA, A., (2003) Urban/rural energy balance observations in a desert city in northern Mexico. *Proceedings of Fifth International Conference on Urban Climate*, Lodz, Poland, 177–180.
- GIVONI, B.; SAARONI, H., (2003) Predicted sun exposed irrigated lawn temperatures. In 5th International Conference on Urban Climate, Lodz, Poland, 5,2.
- GRIMMOND, C.; SOUCH, C.; HUBBLEL, M., (1996) Influence of tree cover on summertime surface energy balance fluxes, San Gabriel Valley, Los Angeles. *Climate Research*, 6, 45-57.
- GRIMMOND, C.; OKE T., (1999) Rates of evaporation in urban areas. *Impacts of Urban growth on surface and ground waters*. International Association of Hydrological Sciences Publication, 259, 235–243.

- GUHATHAKURTA, S.; GOBER, P., (2007) The impact of the Phoenix urban heat island on residential water use. *Journal American Planning Association*, 73 (3), 317–329.
- GULYÁS, A.; UNGERAND J., MATZARAKIS, A., (2006) Assessment of the microclimatic and human comfort conditions in a complex urban environment: modelling and measurements. *Building and Environment*, 41, 1713–1722.
- HAMADA, S.; OHTA, T., (2010) Seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on surrounding urban areas. *Urban Forestry & Urban Greening*, 9, 15–24.
- HELBIG, A.; MATZARAKIS, A.; PIACENTINI, E., (2007) North-South variation of bioclimatic parameters in Argentina during summer months, in: A. Matzarakis, C. de Freitas, D. Scott (Eds.). *Developments in Tourism Climatology*, 66-73.
- HOLMER, B.; ELIASSON, I., (1999) Urban-rural vapour pressure differences and their role in the development of urban heat islands. *International Journal of Climatology*, 19, 989–1009.
- HÖPPE, P., (1999) The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *Int. J. Biometeorol.*, 43, 71–75.
- JAUREGUI, E., (1997) Heat island development in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 31 (22), 3821–3831.
- JOHANSSON, E., (2006) Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and Environment*, 41, 1326–1338.
- KOPEC, R., (1973) Daily spatial and secular variations of atmospheric humidity in a small city. *Journal of Applied Meteorology*, 12, 639–648.
- KUTTLER, W.; WEBER, S.; SCHONNEFELD, J.; HESSELSCHWERDT, A., (2007) Urban/rural atmospheric water vapour pressure differences and urban moisture excess in Krefeld, Germany. *Int. J. Climatol.*, 27, 2005–2015.
- LANDSBERG, H., (1981) *The Urban Climate*, International Geophysical Series 28. Academic Press: New York and London.
- LINDÉN, J., (2011) Nocturnal Cool Island in the Sahelian city of Ouagadougou, Burkina Faso. *International Journal of Climatology*, 31 (4), 605–620.
- MARTÍNEZ, C.; BASTÍAS, L.; ENDRIZZI, M.; CÓRICA, L.; PATTINI, A.; CANTÓN, A., (2006) Influencia de las morfologías arbóreas en las condiciones de iluminación en recintos urbanos del área. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 10 (1), 1-7.
- MARTÍNEZ-CARRETERO, E., (2010) The synanthropic flora in the Mendoza (Argentina) urban area. *Urban Ecosystem*, 13, 237-242.
- MATZARAKIS, A.; MAYER, H., (1997) Heat stress in Greece. *Int. J. Biometeorol.* 41, 34–39.
- MATZARAKIS, A.; MAYER, H.; IZOMON, M., (1999) Applications of a universal thermal index: Physiological equivalent temperature. *Int. J. Biometeorol.*, 43 (2), 76 – 84.
- MIRZAEI, P.; HAGHIGHAT, F., (2010) Approaches to study urban heat island, Abilities and limitations. *Building and Environment*, 45, 2192-2201.
- NASRALLAH, H.; BRAZEL, A.; BALLING, R., (2006) Analysis of the Kuwait city urban heat island. *International Journal of Climatology*, 10 (4), 401–405.
- OKE, T., (1976) The distinction between canopy and boundary-layers heat islands. *Atmosphere*, 14, 268–277.
- OKE, T., (1981) Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, 1 (3), 237–254.
- OKE, T., (1982) The energetic basis of the Urban Heat Island, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, 1–24.
- OKE, T., (1989) The micrometeorology of the urban forest. *Journal of Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.* 324, 335–349.
- OKE, T.; SPRONKEN-SMITH, R.; JAUREGUI, E.; GRIMMOND, C., (1999) The energy balance of central Mexico City during the dry season. *Atmospheric Environment*, 33, 3919–3930.
- PEARLMUTTER, D.; BERLINER, P.; SHAVIV, E., (2007) Urban climatology in arid regions: current research in the Negev desert, *International Journal of Climatology* 27, 1875–1885.
- POTCHTER, O.; GOLDMAN, D.; KADISH, D.; ILUZ, D., (2008) The oasis effect in an extremely hot and arid climate: The case of southern Israel. *Journal of Arid Environments*, 72, 1721– 1733,

PULIAFITO, E.; GUEVARA, M.; PULIAFITO, C., (2003) Characterization of urban air quality using GIS as a management system. *Environmental Pollution*, 122, 105-117.

RICHARDS, K., (2005) Urban and rural dewfall, surface moisture, and associated canopy-level air temperature and humidity measurements for Vancouver, Canada. *Boundary-Layer Meteorology*, 114, 143–163,

ROOBA, S., (2003) Urban-suburban/rural differences over Greater Cairo, Egypt. *Atmósfera*, 16, 157–171.

ROTH, M., (2007) Review of urban climate research in (sub) tropical regions. *Int. J. Climatol.* 27, 1859–1873,

SARRAT, C.; LEMONSU, A.; MASSON, V.; GUEDALIA, D., (2006) Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution, *Atmospheric Environment*, 40 (10), 1743–1758,

SCHLINK, U.; HERBARTH, O.; RICHTER, M.; PULIAFITO, J.L.; REHWAGEN, M.; PULIAFITO, C.; BEHLER, J.C.; PULIAFITO, E., (1999) Ozone-monitoring in Mendoza, Argentina: Initial results. *J. Air and Waste Management Assoc.*, 49, 82-87.

SHASHUA-BAR, L.; PEARLMUTTER, D.; ERELL, E., (2009) The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate, *Landscape and Urban Planning*, 92, 179–186,

SOFER, M.; POTCHTER, O., (2006) The urban heat island of a city in an arid zone: the case of Eilat, Israel. *Theor. Appl. Climatol.*, 85, 81–88.

SPAGNOLO, J.; DE DEAR, R., (2003) A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia. *Building and Environment*, 38, 721–738.

SPRONKEN-SMITH, R.; OKE, T., (1998) The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. *International Journal of Remote Sensing*, 19 (11), 2085 – 2104.

TAHA, H., (1997) Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, 25, 99-103.

TOY, S.; YILMAZ, S., (2010) Thermal sensation of people performing recreational activities in shadowy environment: a case study from Turkey. *Theor. Appl. Climatol.*, 101, 329–343.