

ESTUDIO DEL EFECTO TÉRMICO DE ESPACIOS VERDES URBANOS DEL ÁRIDO CON SENSORES REMOTOS ¹

Artículo
Recibido 22-05-2015
Aceptado 01-11-2015

Study on the thermal effect of urban green space in arid zones using remote sensing

ALEJANDRA KURBÁN, Instituto de Estudios en Arquitectura Ambiental (INEAA) - Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño - Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina, akurban@unsj.edu.ar

MARIO CÚNSULO, Instituto de Estudios en Arquitectura Ambiental (INEAA) - Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño - Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina, mcunsulo@unsj.edu.ar

RESUMEN

Se estudia el efecto térmico estacional de los espacios verdes urbanos en una ciudad de zona árida (San Juan, Argentina), a través del procesamiento de imágenes satelitales multiespectrales tipo LANDSAT 5 TM+ correspondientes al año 2011. La temperatura del aire se obtiene con el método TvX a partir de un muestreo amplio de relaciones entre el índice normalizado de vegetación NDVI y la temperatura de superficie. Los datos térmicos se combinan con registros de una estación meteorológica ubicada en el centro de la ciudad. Se cuantifican dichos datos y se relacionan con las bandas urbanas características de la ciudad y la isla de calor estacional, esta última obtenida del procesamiento de las mismas imágenes satelitales de 2011. Los resultados convalidan y amplían los conseguidos a partir de un previo trabajo de campo in situ, respecto al efecto bioclimático de los espacios verdes en sus ambientes urbanos áridos. Se verifica, finalmente, la eficiencia del uso de la teledetección para estudios urbanos, cuyos alcances puedan aplicarse al diseño urbano bioclimático.

Palabras clave

diseño urbano bioclimático, imágenes satelitales, zonas áridas.

ABSTRACT

The seasonal thermal effect of urban green space in an arid city (San Juan, Argentina) was studied by processing LANDSAT 5 TM+ multispectral satellite images for the year 2011. Air temperature was obtained using the TvX method on a broad sampling of relationships between the normalized vegetation index NDVI and surface temperature. Thermal data was combined with meteorological records from a weather station located in the city center. This information was quantified and related to the city's urban characteristic bands and the seasonal heat island, the latter of which was obtained by processing the same 2011 satellite images. The results validate and expand those obtained from previous in situ fieldwork regarding the bioclimatic effect of green space in arid urban environments. Lastly, the efficiency of the use of remote sensing for urban studies whose results can be applied to bioclimatic urban design is verified.

Keywords

bioclimatic urban design, satellite images, arid zones

[1] Artículo de investigación científica y tecnológica elaborado a partir del proyecto de investigación "Estudio Bioclimático de la Forestación con Procesamiento de Imágenes Satelitales", de A. Kurbán, A. Papparelli, M. Cúnsulo, E. Montilla, A. Ortega, G. Roca y A. Álvarez. Proyecto de Investigación bianual subsidiado por la Secretaría de Ciencia y Técnica de la UNSJ. Código 21 A-848. Res. N°131/11-CS. Este estudio contó con la colaboración de la CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales), entidad que proveyó las imágenes satelitales utilizadas y facilitó la inestimable participación de la Dra. Graciela Salinas en el dictado del curso "Teleobservación y procesamiento digital de imágenes satelitales", para la formación de los integrantes de la Unidad Ejecutora. Agradecemos también especialmente al Arq. Carlos Cotlier, al Sr. Diego López y a la Ing. Cecilia Cornero, del Centro de Sensores Remotos, de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario, por su completo y generoso asesoramiento.

1. INTRODUCCIÓN.

La ciudad de San Juan está ubicada en el centro-oeste de la República Argentina (Lat. Sur: 31° 32' 24" y Long. 69° 31'48"), en la denominada "Diagonal Árida de América del Sur", que se extiende desde el norte del Perú hasta el sur de Argentina. El Área Metropolitana de San Juan tiene una superficie de 127Km² (Papparelli et al., 2015), lo que representa el 0,14% del territorio provincial, una población de 458.230 habitantes (el 67% del total provincial) y una densidad poblacional de 36hab/km².

El clima urbano San Juan es Árido Continental Mesotermal. Posee elevadas amplitudes térmicas tanto diarias como estacionales y anuales; bajos tenores de humedad; régimen estival de escasas precipitaciones; y elevada radiación solar en todo el año (Kurbán et al., 2015).

Enmarcado en la línea de investigación de Clima Urbano, desde el año 1996 los autores de este artículo desarrollan proyectos relacionados con el rol de la forestación en la disminución de la carga climática urbana en ciudades localizadas en zonas áridas, tomando como caso de estudio el Área Metropolitana de San Juan - Argentina.

A través de dichos trabajos se estudió i) permeabilidad a la radiación solar global de ejemplares aislados representativos de las especies arbóreas caducifolias y perennifolias implantadas en la ciudad (Kurbán, Papparelli, Cúnsulo, 2004); ii) efecto bioclimático de espacios verdes en sus entornos urbanos (Kurbán et al., 2007a y 2007b.); iii) cuantificación de la cobertura bioclimática del ejido urbano (Kurbán et al., 2009); iv) análisis de la relación entre una normativa internacional de área/habitante aplicada en San Juan y el déficit bioclimático existente en la ciudad (Kurbán et al., 2010).

En todos los casos, los datos de temperatura urbana fueron obtenidos por medio de registros realizados in situ. Si bien estos valores conformaron una base de datos muy precisos y puntuales, al analizar espacios verdes distanciados entre sí, fue necesario contar con información sincrónica de varios puntos de la ciudad, lo cual requirió cálculos de corrección horaria para asimilar la toma correspondiente al mismo instante. Debido a ello y a la necesidad de realizar estudios históricos o temporales del clima de la ciudad influenciados por los espacios verdes, los autores incorporaron una nueva fuente de datos, a partir de imágenes satelitales multiespectrales. Dicho sistema de adquisición de datos, permitía su estudio en simultáneo, presentando además la posibilidad de contrastar estudios previos, y así verificar la fiabilidad de diferentes fuentes de datos.

Son escasas las investigaciones que usan imágenes satelitales para analizar la influencia térmica de los espacios verdes forestados. En general, los sensores remotos de teledetección se han utilizado en los últimos años para estudiar el clima urbano de varias ciudades españolas, tales como Madrid, Segovia, Ávila, Guadalajara y Toledo (Pérez González y García Rodríguez, 2001 y 2002) y Valencia (Valor et al., 2000).

En Santiago de Chile, Sarricolea et al. (2005) analizaron la isla de calor urbana, en virtud de los cambios históricos entre 1998 y 2004. Para la ciudad de Atenas (Stathopoulou et al., 2009), se usaron imágenes satelitales en el estudio de la isla de calor urbana, midiendo las propiedades ópticas y térmicas de materiales usados en edificios y pavimentos.

El propósito del estudio que aquí se expone es verificar si las imágenes satelitales constituyen herramientas idóneas para estudios de planificación y diseño urbano-arquitectónico bioclimático. Para ello, se contrasta los resultados obtenidos con estudios previos realizados por los autores (con mediciones in situ), que consideran los espacios verdes de la ciudad como moderadores del clima.

Se propone, además, estudiar la relación entre el efecto térmico de los espacios verdes urbanos (EVU) y las características de la distribución espacial del área Metropolitana de San Juan, generadoras de condiciones microclimáticas particulares: el clima urbano. Asimismo, se plantea conocer la relación existente entre la isla de calor urbana (principal aspecto del clima urbano) y los efectos térmicos de los EVU.

Dada la manifiesta utilidad del uso combinado de imágenes satelitales con estaciones meteorológicas instaladas en los lugares de análisis (Pérez González; García Rodríguez y Guerra Zaballos, 2003), el trabajo combina los datos obtenidos por sensores remotos, con los registros de una estación meteorológica ubicada en el centro de la ciudad.

El estudio analiza el efecto térmico estacional (verano e invierno) de 19 EVU del Área Metropolitana de San Juan -previamente identificados como bioclimáticamente eficientes (Kurbán et al, 2007a y 2007b)- a través del procesamiento de imágenes satelitales multiespectrales tipo LANDSAT 5 TM+ correspondientes al año 2011.

Las imágenes satelitales, procesadas con el software ENVI 4.7, permiten obtener el Índice Diferencial de Vegetación Normalizado-NDVI y la temperatura del aire, la cual se termo-referencia con una estación meteorológica y se corrige en función de la estadística histórica.

El examen de la influencia térmica de los EVU se lleva a cabo en dos escalas de análisis espacial: de la ciudad y del EVU. Se obtiene, de este modo, isotermas de cada uno de esos espacios y de su entorno, cuya distribución permite observar determinado efecto térmico, el cual se estudia en relación con la isla de calor de la ciudad.

2. ELECCIÓN DE IMÁGENES SATELITALES.

Las imágenes satelitales estacionales utilizadas fueron las LANDSAT 5TM Thematic Mapper, pues se trató de las únicas (disponibles) que cumplían con las condiciones requeridas: no poseían deficiencias de adquisición en sus bandas, cubrían el área de la ciudad de San Juan y proveían la Banda del Infrarrojo Cercano o NIR (B3) y la Banda Térmica (B6), con una resolución espacial conveniente a la escala de los espacios verdes a estudiar. Se trabajó con las últimas imágenes disponibles que cubrían el Área Metropolitana de San Juan, en los siguientes días de verano e invierno de 2011: 09/12/2010 y 22/08/2011, respectivamente. La hora de paso del satélite fue las 14:30, hora solar verdadera (16:00 hora oficial argentina).

3. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES.

A fin de obtener el Índice Diferencial de Vegetación Normalizado - NDVI y la temperatura del aire, las imágenes satelitales se procesaron utilizando el software ENVI 4,7, de acuerdo con las siguientes etapas:

- Calibración radiométrica
- Cálculo del índice diferencial de vegetación normalizado
- Cálculo de temperatura superficial
- Cálculo de temperatura del aire
- Cálculo de temperatura del aire termo-referenciada
- Corrección histórica

Para el desarrollo de los ítems a., b., y c. se siguió el procedimiento desarrollado por Cotlier, López y Cornero (2010). Mientras que el ítem d. se ejecutó con el método Thermal Vegetation Index (Goetz, S. J., Prince, S. D. y Small, J., 2000). La descripción de los 4 primeros ítems consta en Cúnsulo, M., Papparelli, A. y Kurbán, A. (2012). La termo-referenciación se realizó con datos obtenidos en la llamada Banda Eminentemente Urbana de la ciudad² (Papparelli Cúnsulo, Kurbán, 2009), con registros de la Estación Meteorológica propiedad del Instituto de Estudios en Arquitectura Ambiental, unidad ejecutora de pertenencia de los autores.



Figura 1: Espacios verdes urbanos del Área Metropolitana de San Juan, bioclimáticamente eficientes.
Fuente: Elaboración propia sobre la base catastral del Área Metropolitana de San Juan.

4. ESPACIOS VERDES URBANOS DE ESTUDIO.

Las dimensiones mínimas que requiere un espacio verde urbano para que contribuya a modificar las condiciones higrotérmicas de su entorno, disminuyendo la rigurosidad del clima urbano (dimensiones menores limitan su influencia bioclimática a su propia superficie), son: Superficie mínima: 0,80ha; Lado mínimo: 50m (Kurbán et al, 2007a y 2007b).

En el Área metropolitana de San Juan existen 508 espacios verdes de los cuales sólo 19 presentan condiciones dimensionales y urbanísticas que les permiten ejercer su influencia bioclimática en su entorno urbano (Kurbán et al., 2009) (Figura 1). Por las características históricas fundacionales de las ciudades de nuestro país, la ciudad de San Juan se caracteriza por su trazado en damero de aproximadamente 120m de lado, razón por la que 17 de los 19 EVU poseen una superficie de 13.800m². Los dos restantes, son considerados parques, con superficies de 12ha y 6ha, respectivamente.

Cada EVU fue relevado *in situ* y cartográficamente, calculándose para cada uno de ellos, los siguientes índices:

- Superficie catastral del EVU (m²)

[2] El concepto de Banda Eminentemente Urbana, se explicita en páginas 16 y 17.

Nº EVU	DENOMINACIÓN EVU	SUPERFICIE (m ²)	SECTOR CARDINAL
1	Plaza 25 de Mayo	11755,12	CENTRO DE EJES
2	Plaza Gertrudis Funes	13202,02	NORESTE
3	Plaza Antonino Aberastain	11852,99	ESTE
4	Plaza Gral. San Martín	10265,88	
5	Plaza Acceso Sur	11468,77	SURESTE
6	Plaza Hipólito Irigoyen	14938,53	SUR
7	Plaza Almirante Brown	15500,33	
8	Plaza Villa Krause	13035,25	
9	Plaza Bº San Damián	9328,84	SUROESTE
10	Parque Rawson	63373,03	
11	Plaza Narciso Laprida	10265,88	OESTE
12	Plaza España	12870,04	
13	Parque de Mayo	125.303,50	
14	Plaza Salvador Mº del Carril	11863,33	
15	Plaza Manuel Belgrano	11587,69	
16	Plaza San Roque	7806,15	
17	Plaza Bº Camus	13838,67	
18	Plaza Huaziul	7305,62	NOROESTE
19	Plaza Bº Villa Obrera	9981,58	

Tabla 1: Denominación de los EVU estudiados, superficie y sector cardinal en que se encuentra, en relación con el centro de la ciudad.
 Fuente: Elaboración propia.

- Superficie real del EVU (m²)
- Superficie de proyección arbórea (m²)
- Altura promedio arbórea por especie (m)
- Altura promedio del EVU (m)
- Impronta arbórea (%)
- Volumetría arbórea (por especie y total) (m³)
- Densidad volumétrica arbórea (m³/ha)

En la Tabla 1 se presenta la información con la denominación del EVU, su superficie y el sector cardinal en el que se encuentra en relación con el centro espacial de la ciudad: Plaza 25 de Mayo.

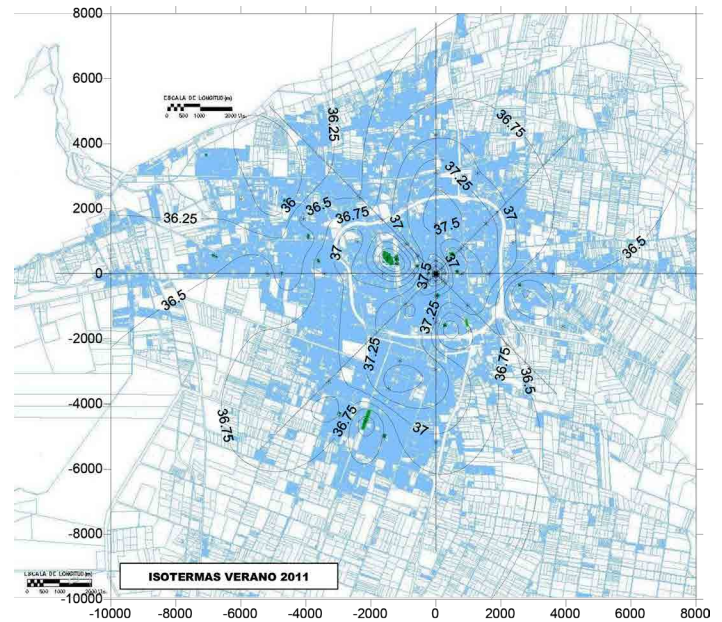


Figura 2: Isotermas de verano del Área Metropolitana de San Juan – Año 2011.
 Fuente: Elaboración propia sobre la base catastral del Área Metropolitana de San Juan.

5. MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE DATOS TÉRMICOS DE LOS EVU.

5.1 PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DEL NDVI Y TEMPERATURA DEL AIRE DE LOS EVU DE ESTUDIO.

En cada EVU se generó una “región de interés” del menú del citado software ENVI 4.7, para promediar los valores de los píxeles que comprende la sección de la forma geométrica que se adopte. Geométricamente, el 90% de los EVU puede asimilarse a un círculo de 66m de radio. Por ello, se adoptó la región circular conformada por 12 píxeles, los cuales integran la información correspondiente a un círculo de 60m de radio. Ésta se hizo coincidir con el centro de cada EVU y con la opción Stats se calcularon los valores promedio en dicha superficie correspondientes al Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI) y a la temperatura del aire.

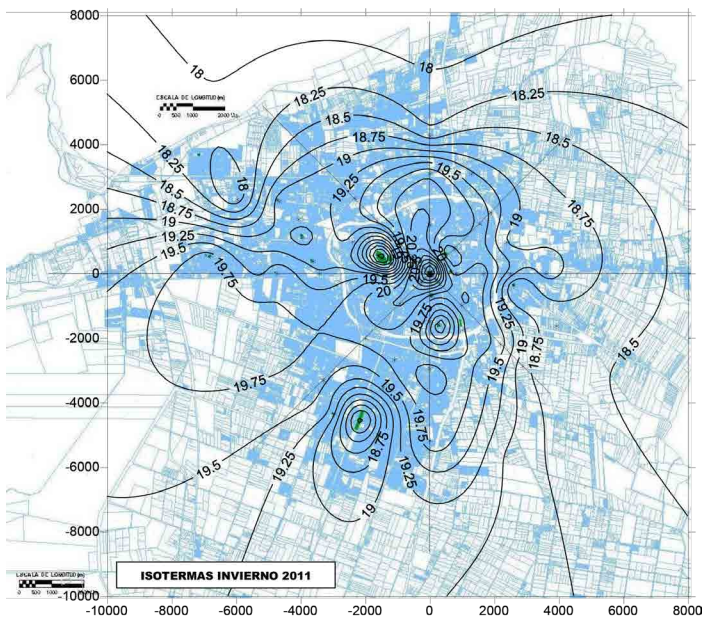


Figura 3: Isotermas de invierno del Área Metropolitana de San Juan – Año 2011.

Fuente: Elaboración propia sobre la base catastral del Área Metropolitana de San Juan.

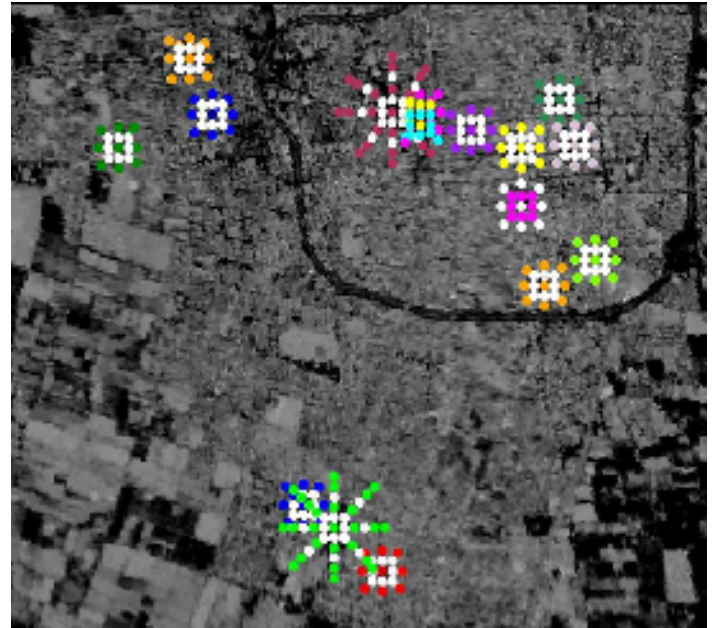


Figura 4: Sector de la imagen satelital procesada para obtención de temperatura del aire de verano 2011, que muestra algunos ejemplos de EVU con 17 y 24 puntos de toma.

Fuente: Elaboración propia.

5.2 ESCALAS ESPACIALES DE ANÁLISIS.

El estudio de la influencia térmica de los EVU se realizó en dos escalas de análisis espacial: a) Escala de la ciudad de San Juan; y b) Escala del EVU.

a) Escala de la ciudad de San Juan: para verificar la afectación de los EVU en todo el espacio urbano, se incorporó información térmica de las mismas imágenes, obtenidas y procesadas por Cúnsulo et al. (2013). Por tanto, a los 19 valores de temperatura del aire de cada EVU, se le incorporaron 64 puntos de medición correspondientes a otros tantos Nodos Urbanos Muestra, representativos del espacio urbano de la ciudad. Con el archivo de datos de 83 puntos referenciados al centro de la ciudad, Plaza 25 de Mayo, se obtuvieron las isotermas de verano e invierno (Figuras 2 y 3).

b) Escala del EVU. Al valor de temperatura del aire representativo del EVU obtenido anteriormente, se le adicionó mayor cantidad de datos conforme su tamaño: en el caso de plazas de aproximadamente 1,4ha, se identificaron 16 datos en su contorno; en los dos parques, los datos incorporados fueron 24. En todos los casos, la distribución de los puntos de registro fue radial, con origen

en el centro de cada EVU y en el eje de los Rumbos y Medio-rumbos cardinales.

En la Figura 4 se presenta la imagen satelital procesada para obtener temperatura del aire de verano 2011. En ella se exhiben algunos ejemplos de EVU con 17 y 24 puntos de toma.

6. ARCHIVO DE DATOS TÉRMICOS ESTACIONALES DE LOS EVU.

Se obtuvo un total de 712 valores de temperatura del aire en los EVU y sus entornos inmediatos y mediatos: 306 por cada estación climática. Esta base de datos se referenció al centro de cada EVU, aplicándose un software de interpolación de datos, con lo que pudieron modelizarse las isotermas de verano e invierno. A modo de ejemplo, en la Figura 5 se muestran las isotermas de verano del Parque de Mayo, localizado en la zona adyacente al área central de la ciudad y su perfil espacial; y en la Figura 6, las correspondientes a la Plaza del Barrio Huazihul ubicada en el área suburbana.

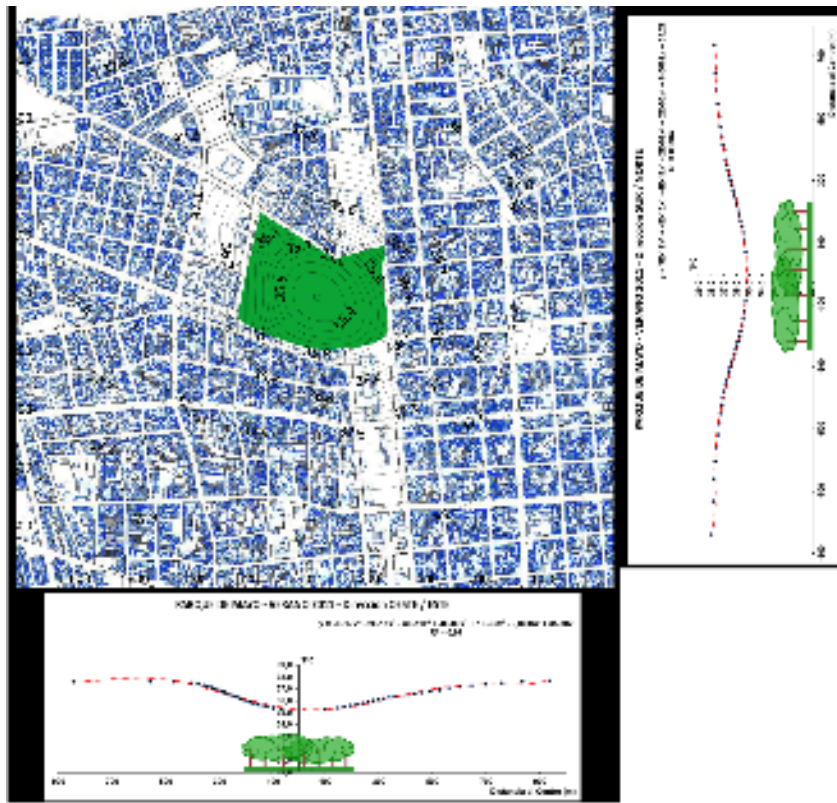


Figura 5: Isothermas Parque de Mayo – verano 2011.
 Fuente: Elaboración propia sobre la base catastral del Área Metropolitana de San Juan.

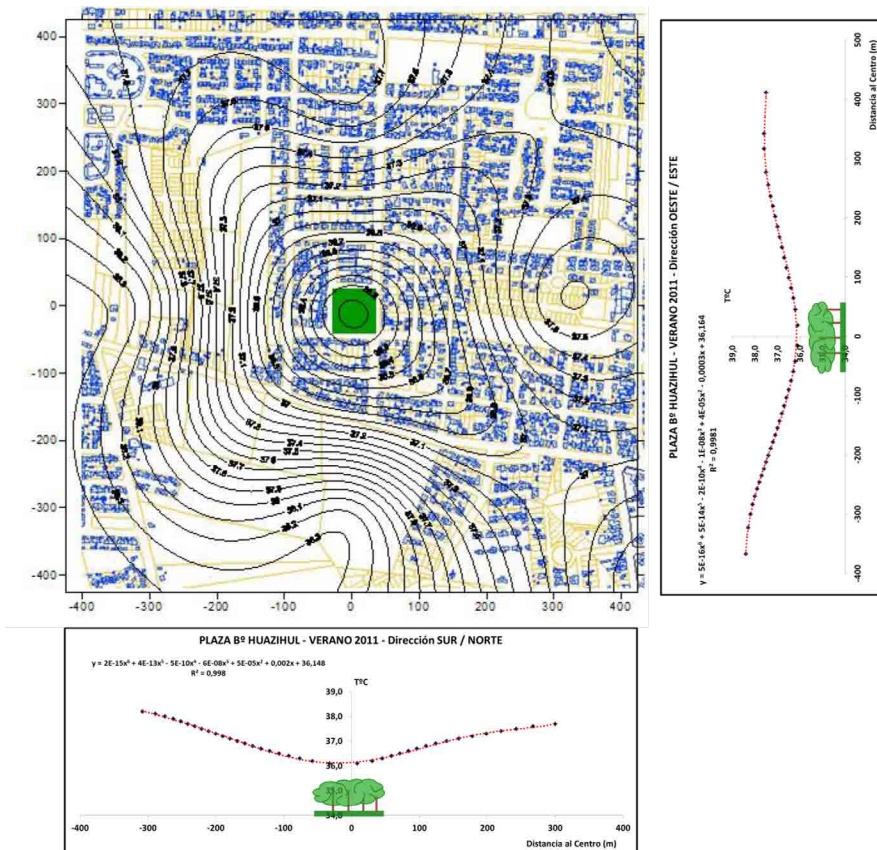


Figura 6: Isothermas Plaza Huazihul – verano 2011.
 Fuente: elaboración propia sobre la base catastral del Área Metropolitana de San Juan.

7. EFECTO TÉRMICO DE LOS EVU Y BANDAS URBANAS CARACTERÍSTICAS.

El efecto térmico estacional de los EVU se analiza conforme tres aspectos interrelacionados: climáticos, espaciales y arbóreos. Los indicadores y las variables involucradas en cada caso son:

- **INTENSIDAD** ($\Delta T^{\circ}\text{C}$): diferencia de temperatura existente entre el EVU y su entorno.
- **ALCANCE** (*AI* en m): longitud hasta la cual aumenta el efecto térmico del EVU. A partir de esa longitud el efecto se mantiene constante o casi constante. Se mide con origen en el baricentro de cada EVU y en las direcciones cardinales principales.
- **IMPRONTA ARBÓREA** (*IA* en %): porcentaje de superficie arbórea proyectada sobre el terreno del EVU (medido a 90° sobre el plano horizontal), en relación a la superficie total del mismo.

7.1 BANDAS URBANAS CARACTERÍSTICAS.

La distribución de la temperatura del aire urbano que se aprecia en las isotermas de las Figuras 2 y 3, es consecuencia de la interrelación de todos los elementos de la ciudad, entre ellos los espacios verdes. Por tanto, la influencia térmica que dichos EVU proporcionen, no solo tendrá relación con sus propias características (superficie, morfología, impronta arbórea, especies arbóreas y canopia de su forestación), sino con la modalidad del espacio construido en el cual se inserta: tipología de canales viales, porcentaje de ocupación del suelo, volumetría edilicia.

Para analizar el efecto térmico de los EVU en su entorno urbano se incorporó el concepto de "bandas urbanas características", entendidas como "áreas homogéneas y continuas del ejido urbano, con índices urbanísticos de similar valor que identifican su condición territorial y su estado de situación espacial, comprendidas entre dos isolíneas representativas de Factores de Ocupación del Suelo, las que actuando como límites, determinan una superficie circunvalar al centro principal de la ciudad" (Papparelli *et al.*, 2009: 11).

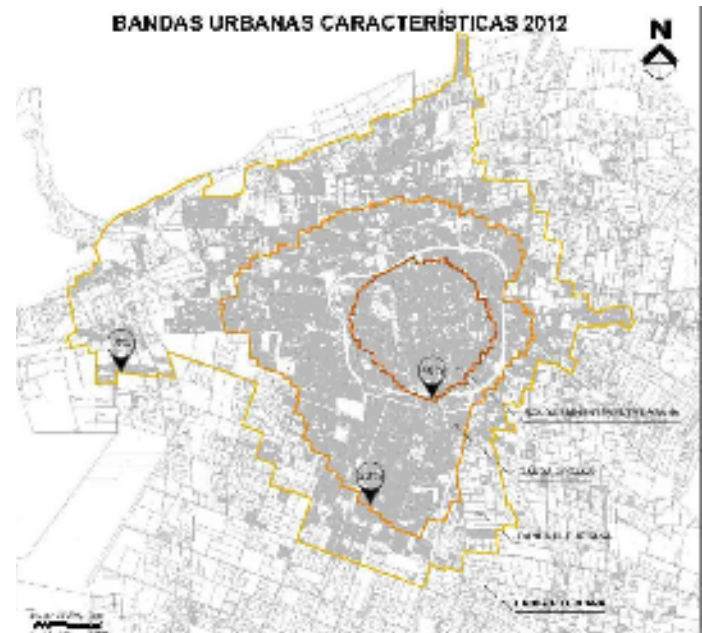


Figura 7: Bandas urbanas características del Área Metropolitana de San Juan.
Fuente: Elaboración propia sobre la base catastral de la ciudad.

En Cúnsulo *et al.* (2013) se obtuvieron las bandas urbanas características del área metropolitana de San Juan del año 2012 (Figura 7). El método define, por medio del factor de ocupación del suelo, cuatro bandas urbanas características: Eminentemente Urbana, Urbana, Suburbana y No Urbana. Los límites espaciales de cada una de ellas se corresponden con la modelización de las isolíneas del factor de ocupación del suelo de acuerdo con los siguientes valores:

Banda eminentemente Urbana:	FOS > 40%	
Banda Urbana:	20% >	FOS >
Banda Suburbana:	5% >	FOS > 20%
Banda no Urbana:	5% >	FOS

Estas bandas se relacionan con las volumetrías edilicias y su consecuente densidad volumétrica.(Figura 7)

La modalidad de la influencia bioclimática de los EVU ubicados en entornos urbanos de diferentes factores de ocupación del suelo y densidad volumétrica edilicia, se analizó en función de sus respectivas localizaciones en las diferentes bandas urbanas características: 9 EVU se ubican en la banda Eminentemente Urbana; 7 EVU en la Urbana y 3 EVU en la Suburbana. En las figuras siguientes se muestran algunas de las correlaciones efectuadas entre la temperatura de los EVU y su entorno, con dos variables: una urbana (distancias al centro de la ciudad) y otra del propio EVU (impronta arbórea). En la Figura 8 se exhiben 3 gráficos correspondientes a cada banda urbana característica, que relacionan las temperaturas de verano con las distancias del

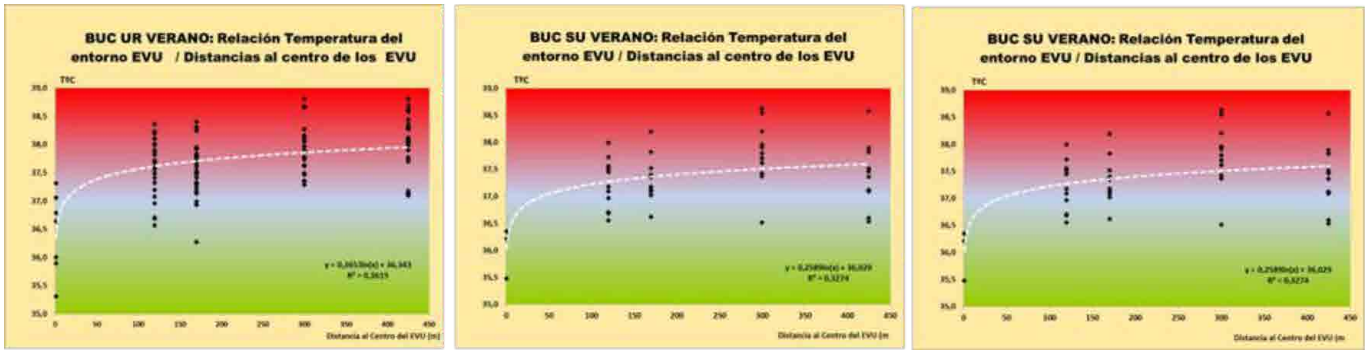


Figura 8: Relación entre las diferencias de temperatura ($\Delta T^{\circ}C$) de verano y las distancias al centro de cada EVU, según bandas urbanas características. Fuente: Elaboración propia.

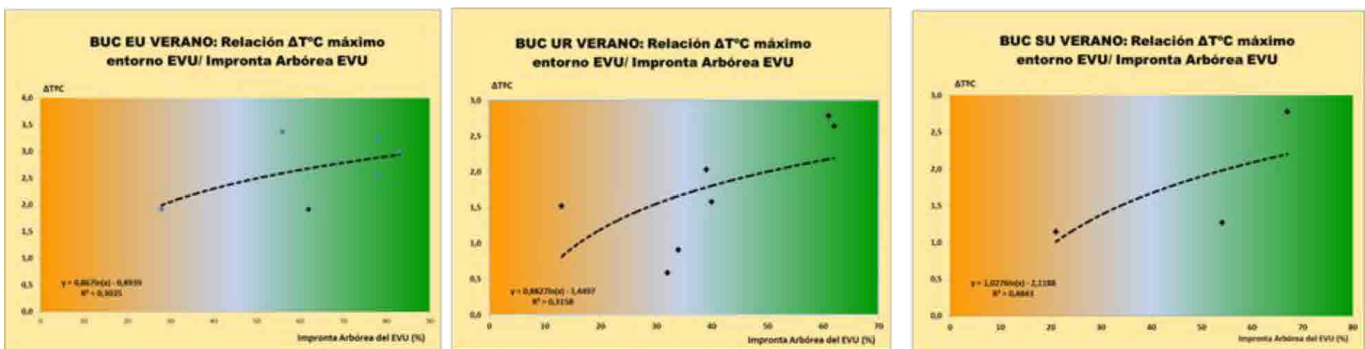


Figura 9: Relación entre las diferencias de temperaturas máximas ($\Delta T^{\circ}C_{máx}$) de verano e improntas arbóreas (%), según bandas urbanas racterísticas. Fuente: Elaboración propia.

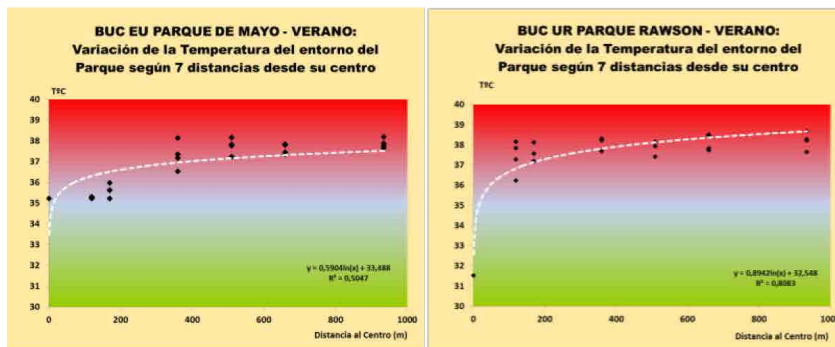


Figura 10: Variación de la temperatura del aire en el Parque de Mayo y su entorno, según 7 distancias a partir del centro (25 datos). Verano. Fuente: Elaboración propia.

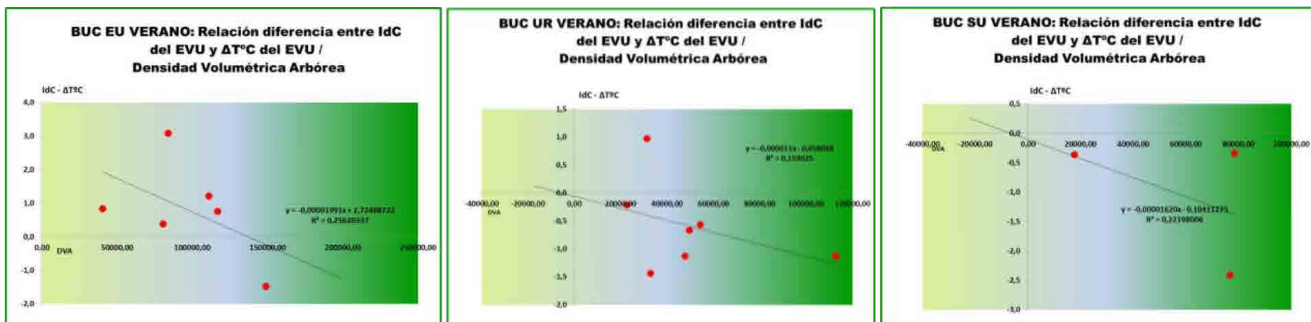


Figura 11: Relación entre las diferencias de isla de calor ($\Delta T^{\circ}IdC$) de verano y densidad volumétrica arbórea (m^3/ha) de cada EVU, según bandas urbanas características. Fuente: Elaboración propia.

EVU al centro de la ciudad; en la Figura 9, la correlación entre improntas arbóreas y diferencias de temperaturas de verano, y en la Figura 10, la variación de la temperatura estival del aire en los parques de Mayo y Rawson, con sus entornos, según 7 distancias, a partir del centro.

7.2 ALCANCES Y MÁXIMA DIFERENCIA DE TEMPERATURA EN CADA EVU.

Con las ecuaciones de las curvas logarítmicas de los gráficos anteriores (y los que no se presentan aquí por cuestiones de espacio), se calcularon los alcances térmicos máximos de los EVU para la banda urbana característica en la que se localizan, y con esa longitud se estimó el $\Delta T^{\circ}\text{C}$ de cada EVU. Los valores obtenidos para el período de verano se muestran en la Tabla 2.

8. EFECTO TÉRMICO DE LOS EVU EN RELACIÓN CON LA ISLA DE CALOR URBANA.

El aumento de la superficie construida producto de la antropización creciente, genera modificaciones al clima macroescalar, uno de cuyos principales aspectos es el fenómeno de la isla de calor urbana, entendida como el calentamiento relativo de la ciudad comparado con las condiciones pre-urbanas (Mazzeo, 1984).

Los grados de antropización, uno de cuyos estudios se aborda a través de las bandas urbanas características, generan respecto al clima de la ciudad uno de sus principales aspectos: la isla de calor urbana, entendida como el calentamiento relativo de la ciudad comparado con las condiciones pre-urbanas (Mazzeo, 1984).

Para analizar el efecto térmico de los EVU integradamente con la isla de calor de la ciudad de San Juan, se lo estudió conjuntamente con la distribución espacial de las isothermas de isla de calor estacionales ejecutadas por Cúnsulo *et al.*, (2013), a partir del procesamiento de las mismas imágenes satelitales utilizadas para el análisis del presente trabajo. El valor de la máxima intensidad de la isla de calor para el año 2012 fue de 5°C en verano y $4,5^{\circ}\text{C}$ en invierno.

Posteriormente, se identificó la isoterma de isla de calor correspondiente a cada EVU y se las relacionó con las diferencias de temperatura que se registraron entre el centro del EVU y su entorno. A la diferencia entre el valor de ambas isothermas, se la denominó "fracción de isla de calor no absorbida por el EVU".

Agrupadas por bandas urbanas características (BUC), en la Tabla 3 constan los datos de cada EVU: densidades volumétricas arbóreas; valor de la isla de calor; alcance

BUC	EVU	ALCANCE (m)	$\Delta T^{\circ}\text{C}$ MÁXIMO ($^{\circ}\text{C}$)
BUC EU	25 DE MAYO	700	1,92
	YRIGOYEN		1,92
	BROWN		3,23
	LAPRIDA		2,54
	FUNES		3,37
	ABERASTAIN		3,00
	ESPAÑA		2,87
	PARQUE DE MAYO	1.000	2,23
BUC UR	PARQUE RAWSON	800	2,75
	SAN MARTIN	700	2,78
	ACCESO SUR		1,52
	VILLA KRAWSE		1,58
	SAN DAMIÁN		0,91
	DEL CARRIL		2,03
	BELGRANO		0,59
	SAN ROQUE		2,64
BUC SU	CAMUS	800	1,14
	Vº OBRERA		1,27
	HUAZIUL		2,78

Tabla 2: Alcance y $\Delta T^{\circ}\text{C}$ máximo de los EVU. Verano.

Fuente: Elaboración propia en base a resultados obtenidos.

BUC	EVU	DENSIDAD VOLUMÉTRICA ARBÓREA (m^3/Ha)	IMPRONTA ARBÓREA (%)	ISLA DE CALOR VERANO ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta T^{\circ}\text{C}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\text{IIC} - \Delta T^{\circ}\text{C}$ ($^{\circ}\text{C}$)
BUC EU	25 DE MAYO	83937,70	62	5,00	1,92	3,08
	YRIGOYEN	40337,51	28	2,75	1,92	0,83
	BROWN	148965,37	78	1,75	3,23	-1,48
	LAPRIDA	111031,70	78	3,75	2,54	1,21
	FUNES	80495,67	56	3,75	3,37	0,38
	ABERASTAIN	116863,78	83	3,75	3,00	0,75
	ESPAÑA	52063,37	35	3,00	2,87	0,13
	PARQUE DE MAYO	74033,30	43	2,75	2,23	0,52
BUC UR	PARQUE RAWSON	14104,01	14	0,44	2,75	-2,31
	SAN MARTÍN	112860,85	61	1,65	2,78	-1,13
	ACCESO SUR	22661,40	13	1,31	1,52	-0,21
	VILLA KRAWSE	47844,75	40	0,45	1,58	-1,13
	SAN DAMIÁN	54325,64	34	0,34	0,91	-0,57
	DEL CARRIL	49659,49	39	1,36	2,03	-0,67
	BELGRANO	31297,95	32	1,56	0,59	0,97
	SAN ROQUE	32823,10	62	1,20	2,64	-1,44
BUC SU	CAMUS	17687,79	21	0,78	1,14	-0,36
	Vº OBRERA	78389,83	67	0,93	1,27	-0,34
	HUAZIUL	76739,30	54	0,37	2,78	-2,41

Tabla 3: Resumen de datos térmicos y arbóreos. Verano.

máximo del efecto térmico: impronta arbórea y fracción de isla de calor no absorbida por el EVU. En la Figura 11 se presentan las correlaciones $\Delta T^{\circ}\text{C}$ máximo y densidad volumétrica arbórea y en la Figura 12, las correspondientes a " $\Delta T^{\circ}\text{C}$ máximo - Isla de Calor" y densidad volumétrica arbórea.

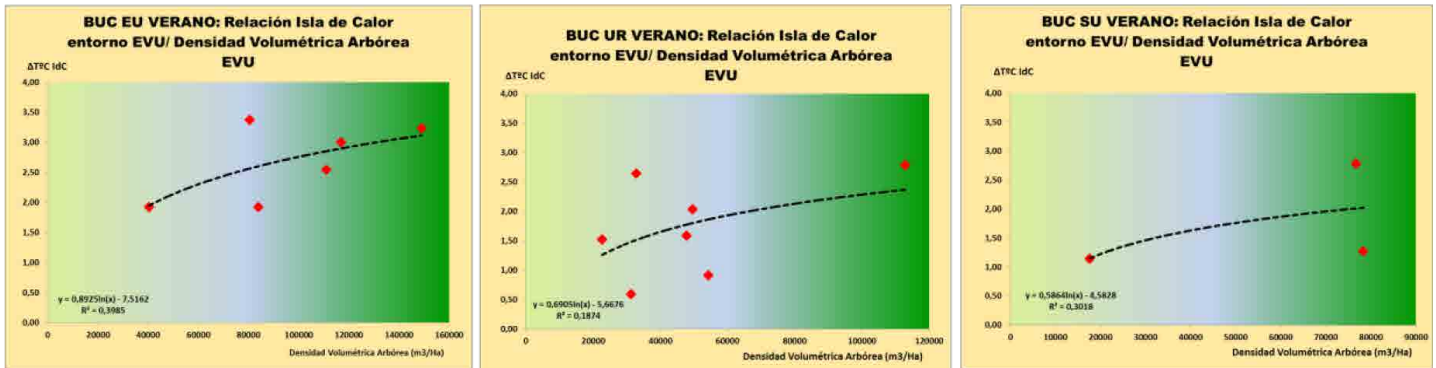


Figura 12: Relación entre las diferencias de la isla de calor y el DT°C máximo del EVU con la densidad volumétrica arbórea, según bandas urbanas características. Fuente: Elaboración propia.

9.RESULTADOS.

a) Resultados para la estación de verano.

- La máxima **INTENSIDAD** del efecto térmico de los EVU disminuye desde el centro urbano a la periferia:

$$EU: \Delta T_{\text{máx}} = 2,71^{\circ}\text{C}; UR: \Delta T_{\text{máx}} = 1,74^{\circ}\text{C}; SU: \Delta T_{\text{máx}} = 1,73^{\circ}\text{C}$$

- El **ALCANCE** máximo del efecto térmico de los EVU aumenta levemente del centro a la periferia urbana:

$$EU: Al_{\text{máx}} 700\text{m}; UR: Al_{\text{máx}} 700\text{m}; SU: Al_{\text{máx}} 800\text{m}$$

- La **IMPRONTA ARBÓREA** mínima que debiera tener un EVU para lograr una **INTENSIDAD** de $\Delta T = 1^{\circ}\text{C}$, aumenta del centro urbano a la periferia:

$$EU: IA_{\text{mín}} 10\% - UR: IA_{\text{mín}} 15\% - SU: IA_{\text{mín}} 20\%$$

Esto quiere decir que para lograr la misma **INTENSIDAD** se requiere mayor porcentaje de impronta arbórea.

- Parque de Mayo:
INTENSIDAD máxima: $\Delta T_{\text{máx}} = 4,08^{\circ}\text{C}$
ALCANCE máximo = $Al_{\text{máx}} 1000\text{m}$

- Parque Rawson:
INTENSIDAD máxima: $\Delta T_{\text{máx}} = 2,75^{\circ}\text{C}$
ALCANCE máximo $Al_{\text{máx}} 800\text{m}$

Para reducir 1°C en el entorno del EVU, se requiere una densidad volumétrica arbórea que resulta muy similar en las tres bandas urbanas características (BUC):

- Para la BUC EU, reducir 1°C requiere una DVA de $14000\text{m}^3/\text{ha}$.
- Para la BUC UR, reducir 1°C requiere una DVA de $16000\text{m}^3/\text{ha}$.
- Para la BUC SU, reducir 1°C requiere una DVA de $14000\text{m}^3/\text{ha}$.

Con esos valores de densidad, por cada grado centígrado que deba reducirse en el entorno del EVU con el fin de compensar la intensidad promedio de la isla de calor y utilizando árboles con una altura media de 12m (altura arbórea promedio en los EVU estudiados), la impronta arbórea necesaria será:

- Para la BUC EU: Promedio de IdC $3,06^{\circ}\text{C}$; $42.840\text{m}^3/\text{ha}$; $3.570\text{m}^2/\text{ha}$; 36% de IA
- Para la BUC UR: Promedio de IdC $1,42^{\circ}\text{C}$; $22.720\text{m}^3/\text{ha}$; $1.893\text{m}^2/\text{ha}$; 19% de IA
- Para la BUC SU: Promedio de IdC $1,21^{\circ}\text{C}$; $16.940\text{m}^3/\text{ha}$; $1.412\text{m}^2/\text{ha}$; 14% de IA

b) Resultados para la estación de invierno:

La máxima **INTENSIDAD** del efecto térmico de los EVU disminuye desde el centro urbano a la periferia:

$$EU: \Delta T_{\text{máx}} = 3,56^{\circ}\text{C}; UR: \Delta T_{\text{máx}} = 1,68^{\circ}\text{C}; SU: \Delta T_{\text{máx}} = 1,57^{\circ}\text{C}$$

El **ALCANCE** máximo del efecto térmico de los EVU disminuye del centro a la periferia urbana:

$$EU: Al_{m\acute{a}x} 1.000m; UR: Al_{m\acute{a}x} 800m; SU: Al_{m\acute{a}x} 600m$$

La **IMPRESIÓN ARBÓREA** mínima que debiera tener un EVU para lograr una **INTENSIDAD** de $\Delta T = 1^{\circ}C$, aumenta del centro urbano a la periferia:

$$EU: IAm\acute{a}n 10\% - UR: IAm\acute{a}n 15\% - SU: IAm\acute{a}n 30\%$$

Es decir que para lograr la misma **INTENSIDAD**, se requiere mayor porcentaje de impronta arbórea.

Parque de Mayo:

$$INTENSIDAD \text{ m\acute{a}xima: } \Delta T_{m\acute{a}x} = 8,87^{\circ}C$$

$$ALCANCE \text{ m\acute{a}ximo} = Al_{m\acute{a}x} 1.500m$$

Parque Rawson:

$$INTENSIDAD \text{ m\acute{a}xima: } \Delta T_{m\acute{a}x} = 4,57^{\circ}C$$

$$ALCANCE \text{ m\acute{a}ximo} = Al_{m\acute{a}x} 1.100m$$

Para reducir $1^{\circ}C$ en el entorno del EVU, se requieren las siguientes densidades volumétricas arbóreas:

- Para la BUC EU, reducir $1^{\circ}C$ requiere una DVA de $15.000m^3/ha$

- Para la BUC UR, reducir $1^{\circ}C$ requiere una DVA de $20.000m^3/ha$

- Para la BUC SU, reducir $1^{\circ}C$ requiere una DVA de $25.000m^3/ha$

Con tales valores de densidad, por cada grado centígrado que deba reducirse en el entorno del EVU para compensar la intensidad promedio de la isla de calor en cada ~~ta~~ esa Banda, y utilizando árboles con una altura media de 12m (altura arbórea promedio de los EVU estudiados), la impronta arbórea necesaria será:

- Para la BUC EU: Promedio de IdC $2,87^{\circ}C$; $43.050m^3/ha$; $3587m^2/ha$; 36% de IA

- Para la BUC UR: Promedio de IdC $1,00^{\circ}C$; $20.000m^3/ha$; $1.667m^2/ha$; 17% de IA

- Para la BUC SU: Promedio de IdC $0,59^{\circ}C$; $14.750m^3/ha$; $1.229m^2/ha$; 12% de IA

CONCLUSIONES.

La sustentabilidad de nuestras ciudades requiere esfuerzos destinados a la disminución de la dependencia de los recursos naturales fósiles, para ofrecer a la población mejores condiciones en su calidad de vida. Como aporte a ese propósito, se han estudiado bioclimáticamente los espacios verdes urbanos en una ciudad de clima árido continental: el Área Metropolitana de San Juan, Argentina.

El trabajo se ha ejecutado a partir de datos estivales e invernales, obtenidos por teledetección con sensores remotos, y termo-referenciados con una estación meteorológica ubicada en el centro de la ciudad. Esta herramienta permitió analizar el efecto térmico de los espacios verdes insertos en contextos urbanos con diferentes índices urbanísticos de factor de ocupación del suelo y densidad volumétrica edilicia. Se trató de conocer, en definitiva, la interrelación bioclimática entre los EVU, el clima urbano árido de la ciudad y la isla de calor resultante.

A continuación, se sintetizan puntualmente conclusiones referidas a las imágenes satelitales como herramientas de planificación urbana bioclimática, y al efecto térmico de los espacios verdes urbanos.

Utilización de imágenes satelitales.

Si bien la adquisición y el procesamiento de las imágenes satelitales para obtención de temperatura del aire, es laborioso y complejo, dichas imágenes resultan una herramienta idónea para trabajos de planificación urbana bioclimática.

Se convalidó el uso de las imágenes satelitales LANDSAT TM para la obtención del NDVI y la temperatura del aire y, por tanto, constituyen una herramienta idónea en trabajos de arquitectura y urbanismo bioclimático.

Es imprescindible complementar los datos térmicos satelitales con mediciones *in situ* para termo-referenciar los datos de sensores remotos.

Aunque el tiempo de obtención de datos no se reduce significativamente, el uso de imágenes satelitales disminuye en gran medida el arduo trabajo de campo que involucra la toma *in situ* con sensores ambientales.

Los resultados convalidan los obtenidos previamente en un trabajo de campo *in situ* referido al efecto de refrescamiento de los espacios verdes urbanos, y permiten ampliar los estudios de eficiencia térmica de los espacios verdes urbanos, tanto en el tiempo como en el espacio.

Efecto térmico de los espacios verdes urbanos.

Se identificaron puntos frescos de la ciudad, en coincidencia con los EVU:

La mayor diferencia de temperatura del aire en el verano entre las áreas verdes más frescas y las **áreas** construidas más cálidas fue de 6,00°C. Se calculó que esa diferencia de temperatura se corresponde con un Índice Diferencial de Vegetación Normalizado - NDVI de 0,582972. Este valor indicaría el índice que deberían tener los EVU para lograr esa diferencia de temperatura.

Se demostró el impacto positivo que ejercen los EVU sobre el clima urbano, confirmando anteriores estudios, con mediciones *in situ*, sobre sus efectos en el refrescamiento de la ciudad.

Se identificó que el efecto térmico de los EVU está fuertemente asociado a la isla de calor de la ciudad, ya que la intensidad del efecto térmico disminuye del centro a la periferia urbana. En consecuencia, para compensar la intensidad promedio de la isla de calor, utilizando árboles con una altura media, la impronta arbórea necesaria en invierno y verano en la Banda Suburbana se reduce a 1/3 de la correspondiente a la Banda Eminentemente Urbana.

La aplicación de los resultados obtenidos redundará en el mejoramiento de las condiciones de confort higrotérmico de la población, tanto en el uso de los espacios abiertos, como en su efecto asociado de disminución de la carga térmica edilicia, proveyendo ambientes interiores bioclimáticamente más sanos y confortables.

Este conocimiento representa una contribución importante a la planificación urbana bioclimática en zonas áridas, al permitir al urbanista utilizar los espacios verdes como amortiguadores de la isla de calor urbana.

10.REFERENCIAS

COTLIER, Carlos., LÓPEZ, Daniel y CORNERO, Cecilia. Apuntes del curso de Posgrado/Maestría en Ingeniería Vial "Los Sistemas de Información Geográfica y Teledetección: Geomática aplicada al uso urbano, regional y medio ambiente". 2010. *Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura*, Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina.

CÚNSULO, Mario, PAPPARELLI, Alberto y KURBÁN, Alejandra. Inferencia de la temperatura del aire urbano a partir del "NDVI" utilizando imágenes satelitales. *Avances en Energías Renovables y Ambiente AVERMA*, 2012, vol. 16, pp. 11.01-11.07.

CÚNSULO, Mario, KURBÁN, Alejandra, PAPPARELLI, Alberto, MONTILLA, Eduardo. Procesamiento de datos térmicos satelitales para la obtención de la isla de calor urbana. *Avances en Energías Renovables y Ambiente AVERMA*, 2013, vol. 1, pp. 11.11-11.18.

GOETZ, S. J., PRINCE, S. D. y SMALL, J. Advances in Satellite Remote Sensing of Environmental Variables for Epidemiological Applications. *Advances in Parasitology*, 2000, vol. 41, pp. 289-307.

KURBÁN, Alejandra, PAPPARELLI, Alberto y CÚNSULO, Mario. Measurements of the Bioclimatic Effects of Groups of Trees in an Argentinian Arid City. *Architectural Science Review*, 2004, vol. 47, n°4, pp. 339-346.

KURBÁN, Alejandra, PAPPARELLI, Alberto, **CÚNSULO**, Mario. y MONTILLA, Eduardo. Shading by urban forests in arid ecosystems. *Architectural Science Review*, 2007a, vol. 50.2, pp. 122-129.

KURBÁN, Alejandra, PAPPARELLI, Alberto, CÚNSULO, Mario, MONTILLA, Eduardo y RÍOS, Eliana. Espacios verdes y temperatura urbana en ecosistemas áridos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente AVERMA*, 2007b, vol. 11, pp. 11.09 - 11.15.

KURBÁN, Alejandra, PAPPARELLI, Alberto, CÚNSULO, Mario, MONTILLA, Eduardo, ORTEGA, Andrés, ROCA, Gabriela y RIPOLL, Verónica. Cobertura bioclimática arbórea en una ciudad de zona árida. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente AVERMA*, 2009, vol. 13, pp. 11.85 - 11.91.

KURBÁN, Alejandra, PAPPARELLI, Alberto, CÚNSULO, Mario, MONTILLA, Eduardo, ORTEGA, Andrés, ROCA, Gabriela y RIPOLL, Verónica. Espacios verdes forestados y población en clima urbano árido. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente AVERMA*, 2010, vol. 14, pp. 11.85 - 11.92.

KURBÁN, Alejandra, CÚNSULO, Mario, ALVAREZ, Analia, MONTILLA, Eduardo y ORTEGA, Andrés. The role of bioclimatic architecture in the reduction of the emission of CO₂ in arid environments. *Environmental Science*. Ed. Trade Science Inc., 2015, vol. 11, issue 6, pp. 171-178.

MAZZEO, Nicolás. *Aplicaciones del Diagnóstico Climático a problemas relacionados con el urbanismo*. Curso Internacional de Posgrado en Climatología. Depto. de Meteorología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 1984.

PAPPARELLI, Alberto, CÚNSULO, Mario y KURBÁN, Alejandra. *Planificación Sustentable del Espacio Urbano*. Buenos Aires: Editorial Klickzowski/NOBUKO, 2009.

PAPPARELLI, Alberto, CÚNSULO, Mario y KURBÁN, Alejandra. *Isla de Calor Urbana obtenida con imágenes satelitales*. Informe proyecto de investigación (2011/2013). CICTCA - UNSJ 21A – 857.

PAPPARELLI, Alberto, KURBÁN, Alejandra, CÚNSULO, Mario, MONTILLA, Eduardo *Características de la Distribución Espacial en el Área metropolitana de San Juan – Estadística 2010*. Buenos Aires: Editorial Klickzowski/NOBUKO, 2015.

PÉREZ GONZÁLEZ, María Eugenia. y GARCÍA RODRÍGUEZ, María Pilar. Estudio de las Bandas Térmicas ETM en la Comunidad de Madrid y alrededores. *El Tiempo del Clima*, 2001, Serie A, n°2, pp. 499-508.

PÉREZ GONZÁLEZ, María Eugenia y GARCÍA RODRÍGUEZ, María Pilar. Cartografía térmica del área metropolitana de Madrid a partir del sensor ETM del Landsat 7. *Anales de geografía de la Universidad Complutense*, Vol. Extraordinario 2002, pp. 377-386

PÉREZ GONZÁLEZ, María Eugenia, GARCÍA RODRÍGUEZ María Pilar y GUERRA ZABALLOS, Antonio. Análisis del clima urbano a partir de imágenes de satélite en el centro peninsular español. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 2003, vol. 23, pp. 187- 206.

SARRICOLEA Pablo, ROMERO Hugo. Cambios de uso y coberturas del suelo entre 1998 y 2004 y sus efectos sobre la configuración de la isla de calor urbana de superficie de Santiago. *Anales de la Sociedad chilena de ciencias geográficas*, 2006, pp. 207-210.

STATHOPOULOU, Marina, SYNNEFA, Afroditi, CARTALIS, Constantinos, SANTAMOURIS, Matheos, KARLESSI, Theoni, AKBARI, Hashem. A surface heat island study of Athens using high-resolution satellite imagery and measurements of the optical and thermal properties of commonly used building and paving materials. *International Journal of Sustainable Energy*, 2009, vol. 28, n° 1-3, pp. 59-76.

VALOR, Enric, CASELLES, Vicente, COLL, César, SÁNCHEZ, Juan, RUBIO, Eva, SOSPEDRA, Francisco. Análisis comparativo del efecto de la isla térmica de la ciudad de Valencia con imágenes TM, MUST y AVHRR. *Revista Teledetección*, N°14 2000, pp. 5-10.