



DESEMPEÑO TÉRMICO DE CUBIERTAS VERDES EN CIUDADES DE ZONAS ÁRIDAS

THE THERMAL PERFORMANCE OF GREEN ROOFS IN ARID CITIES

JUAN E. FLORES ASIN
Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía -INAHE- CCT Conicet
Mendoza. Mendoza, Argentina
eflores@mendoza-conicet.gob.ar

CLAUDIA F. MARTINEZ
Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía -INAHE- CCT Conicet
Mendoza. Mendoza, Argentina
cmartinez@mendoza-conicet.gob.ar

JM. ALICIA CANTÓN
Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía -INAHE- CCT Conicet
Mendoza. Mendoza, Argentina
ecorrea@mendoza-conicet.gob.ar

ERICA N. CORREA
Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía -INAHE- CCT Conicet
Mendoza. Mendoza, Argentina
macanton@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN

Las cubiertas verdes constituyen una estrategia de enverdecimiento urbano que contribuye a reducir los efectos del calentamiento global, disminuyendo las temperaturas urbanas y los consumos de energía en espacios interiores derivados del acondicionamiento térmico, para alcanzar condiciones de confort en verano. Sin embargo, su implementación en zonas áridas está supeditada al uso de especies vegetales de bajo consumo de agua. Este trabajo evalúa el desempeño térmico de cubiertas verdes con dos especies de distinto hábito de crecimiento y requerimiento hídrico: *Aptenia cordifolia* y *Sedum spectabile*. Con tal fin se desarrollaron mediciones de variables meteorológicas en módulos experimentales, mediante microadquisidores de datos, durante la estación verano 2015. Los resultados obtenidos demuestran que las cubiertas verdes permiten disminuir la temperatura media interior en 2°C, la amplitud térmica en 8°C y la temperatura máxima en 6°C, con diferencias poco significativas entre las especies evaluadas (0.5°C). Estos valores reflejan la eficiencia térmica de dichas cubiertas y la necesidad de ampliar las especies vegetales estudiadas para determinar rangos de beneficio en torno a especies de baja demanda hídrica y alta disponibilidad local.

Palabras clave

cubiertas verdes, desempeño térmico, demanda hídrica, variedades vegetales

ABSTRACT

Green roofs are an urban greening strategy that mitigates the effects of global warming by reducing urban temperatures and energy consumption derived from indoor thermal conditioning used to achieve comfort conditions in summer. However, its implementation in arid cities is dependent upon the use of plant species with low water consumption. This paper assesses the thermal performance of green roofs employing two species with different growth habits and water demand: *Aptenia cordifolia* and *Sedum spectabile*. To this end, meteorological variables were measured in experimental cells by data loggers during the 2015 summer season. The results show that green roofs reduce average interior temperature by 2 °C, thermal amplitude by 8 °C, and maximum temperature by 6 °C, while Differences between the species tested were insignificant (0.5 °C). These values reflect the thermal efficiency of green roofs and the need to increase the number of species studied in order to determine the different benefits from species with low water consumption and high local availability.

Keywords

green roofs, thermal behavior, water demand, plant varieties





Módulos experimentales	Cubierta Tradicional (CT)	Cubierta verde <i>Aptenia cordifolia</i> (CV _{Ac})	Cubierta verde <i>Sedum spectabile</i> (CV _{Se})
			

Figura 1. Diseño experimental. Fuente: Elaboración de los autores.

INTRODUCCIÓN

Una de las estrategias dirigidas a garantizar la sustentabilidad del medio construido y mitigar el fenómeno de isla de calor urbana lo constituye el “enverdecimiento urbano”, es decir, la incorporación de espacios verdes en las ciudades (Clarck y Matheny, 1998).

En las últimas décadas, han surgido nuevas tecnologías -techos y muros verdes- asociadas a la necesidad de aumentar la relación entre la biomasa y las edificaciones en ciudades consolidadas, o sea, en medios urbanos donde la disponibilidad de vacíos es escasa y, en consecuencia, el potencial de incorporación de estructuras verdes tradicionales es limitado.

Esta nueva tendencia en el planeamiento urbano constituye una alternativa viable que impacta tanto a escala urbana como edilicia. En la primera, reduce los efectos del calentamiento global y disminuye las temperaturas del espacio resultante de la articulación de la trama edilicia. En la segunda, esto es, en los espacios interiores, reduce los consumos de energía derivados del acondicionamiento térmico para alcanzar condiciones de confort en la estación cálida (Alexandri y Jones, 2008).

A nivel internacional, numerosos autores han descripto y cuantificado los beneficios de los techos verdes asociados a la determinación de las temperaturas superficiales de las cubiertas verdes, la temperatura del aire en espacios interiores y espacios urbanos mediatos, con el objeto de determinar el impacto de los sistemas conformados por distintas especies vegetales en la demanda de energía para refrigeración (La Roche, 2009). Dichas investigaciones muestran que las cubiertas verdes pueden disminuir entre 60 y 90% el flujo de calor a través del techo y entre 0.8 y 3°C la temperatura interior (Rosenzweig *et al.*, 2009; Qiu *et al.*, 2013). El alcance y la extensión de estos beneficios varía en función del clima, la tecnología de la envolvente edilicia y las características de la cubierta verde que condicionan el mecanismo de enfriamiento preponderante (Cameron, Taylor y Emmett, 2014).



En Argentina, el interés por estas tecnologías se ha incrementado a partir del año 2013 con la aprobación de la Ley N°4.428. Esta ley tiene por objeto la implementación de “Techos o Terrazas Verdes” en el ámbito de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Desde entonces han surgido, además de programas, documentos y aplicación en obras emblemáticas, empresas generadoras de esta tecnología con aplicación en obra y uso de materiales utilizados en otros países. Sin embargo, su implementación requiere evaluar el desempeño térmico del sistema en relación a las distintas zonas climáticas que caracterizan a la región.

En el caso particular de Mendoza, el ambiente físico está caracterizado por la aridez, de manera que el recurso hídrico es escaso -Índice de aridez=1.7; Precipitación anual=200mm (González Loyarte, Menenti y Diblasi, 2009)-. A nivel urbanístico, la estructura de la ciudad responde al modelo reconocido internacionalmente como *ciudad oasis*, con una fuerte presencia de verde dispuesto a lo largo de calles, parques, plazas y patios (Bórmida, 1986). El crecimiento sostenido de la ciudad en los últimos años no ha sido acompañado de un proceso de densificación de los espacios verdes, por lo que no se dispone, en la actualidad, de vacíos urbanos para la inserción en la trama de estructuras verdes tradicionales.

En las áreas de mayor demanda de espacios verdes -alta densidad edilicia-, la ciudad cuenta con un elevado porcentaje (60%) de cubiertas planas potencialmente aptas para la implementación de tecnologías verdes (Flores Asin, Martínez y Cantón, 2013). No obstante, su incorporación masiva requiere del diseño y evaluación de sistemas de naturación extensivo bajo las condicionantes que las ciudades de zonas áridas imponen, en particular la restricción hídrica. Esto implica evaluar la eficacia y eficiencia de los sistemas asociados a vegetación de bajo consumo de un recurso escaso pero vital para garantizar la permanencia en el tiempo de las áreas verdes.

Este trabajo evalúa el desempeño térmico de cubiertas verdes con especies que presentan distinta morfología y demanda hídrica, con el propósito de identificar paquetes biológicos factibles de ser empleados como estrategia de acondicionamiento natural de espacios interiores en ciudades de zonas áridas.

Tabla 1. Características de las especies vegetales evaluadas. Fuente: Elaboración de los autores.

Especie	<i>Apteniocordifolia</i>	<i>Sedumspectabile</i>
Característica		
Poder tapizante (%)	73	68
Consumo hídrico (litros.m ² /año)	268	291
Hábito de crecimiento	Rastrero	Erguida

METODOLOGÍA

DISEÑO EXPERIMENTAL.

El diseño experimental responde a la metodología propuesta por La Roche (2009) y tiene por objetivo analizar en forma comparativa la influencia de cubiertas verdes (CV), respecto a cubiertas tradicionales (CT), en el comportamiento térmico de espacios interiores. Para ello, se montaron tres módulos de ensayo en el área experimental del CCT CONICET Mendoza (32°53'52.83"S, 68°52'31.30"O) que permitieran comparar sistemas verdes con distintos paquetes biológicos, respecto a una cubierta tradicional (Figura 1).

Los módulos experimentales conforman volúmenes ciegos de 1m³, de carácter liviano y aislado al exterior. Tecnológicamente, muros y pisos están compuestos por tres capas: placa de cemento en la cara interior (espesor: 10mm), aislación térmica de poliestireno expandido de baja densidad (espesor: 50mm) y placa de fenólico en la cara exterior (espesor: 18mm), acabado esmalte sintético color blanco. La cubierta es de hormigón armado (espesor: 150mm; peso específico 2400Kg/m³); dosificación en volumen: 1-3-3 (cemento, árido grueso y fino), aislada hidráulicamente con membrana Sika® Sarnafil F 610-12 Felt. El empleo de esta clase de cubierta tiene como finalidad evaluar el tipo constructivo comúnmente empleado en la resolución de techos en el parque edilicio de Mendoza.

La tecnología verde está definida por dos capas: una material (manto drenante Sika® GR Aquadrain Extensivo y sistema de riego por goteo subsuperficial) y una biológica. Ésta se compone de sacos de geotextil (3) contenedores del sustrato (arena, orujo agotado y turba negra en iguales proporciones; espesor: 150mm) y especies vegetales.

En este trabajo se evalúa dos especies de disponibilidad local y alta tasa de reproducción agámica, que fueron elegidas de un conjunto de 14 especies preseleccionadas: *Aptenia cordifolia* (L. f.) Schwant, "Baby rose", y *Sedum*

spectabile (Boreau) H. Ohba, "Sedum otoño" (Tabla 1). El análisis comparativo de ambas especies tiene el objetivo de analizar diferentes consumos hídricos y hábitos de crecimiento, con semejante poder tapizante y su incidencia en el comportamiento térmico de las tecnologías verdes y de los espacios interiores conexos.

MÉTODO DE MEDICIÓN

El comportamiento térmico de las tecnologías verdes en sí mismas y de los espacios interiores se evaluó a partir del registro de variables meteorológicas (temperatura de aire, temperatura y contenido de agua del sustrato, y temperatura superficial de la losa), en la estación verano durante un periodo de 24 días. Los datos se registraron cada 15 minutos bajo la siguiente configuración: cinco sensores por módulos con cubierta verde, tres en el módulos testigo y uno de referencia en el espacio abierto.

La ubicación de los sensores se definió en función de ensayos previos dirigidos a determinar la posición más representativa respecto a la variable a medir y evitar la influencia de factores externos. Los sensores localizados en los módulos de ensayo se distribuyeron del siguiente modo: uno en el espacio interior (T_i), dos en la losa de hormigón en la cara superior (T_{SSL}) e inferior (T_{SIL}); y dos en el sustrato (T_s y C_{AS}) para los módulos con cubierta verde (Figura 2).

Los sensores del tipo Onset® HOBOTM Soil Moisture EC5 S-SMC-M005 se calibraron en laboratorio de acuerdo a las recomendaciones del fabricante, encontrándose en el rango de funcionalidad normal (aire: -0.193 a -0.139 m³/m³, agua: +0.521 a +0.557 m³/m³). Los sensores del tipo Onset® HOBOTM 12-bit Temp Sensor S-TMB-M002 fueron calibrados con salto de escalón térmico en laboratorio. El comportamiento fue uniforme y mostraron igual sensibilidad al enfriamiento y al calentamiento. Los desvíos se encontraron en un rango de ± 3.00 % respecto de la media general (rango de temperaturas del fabricante: -40 a 75°C).

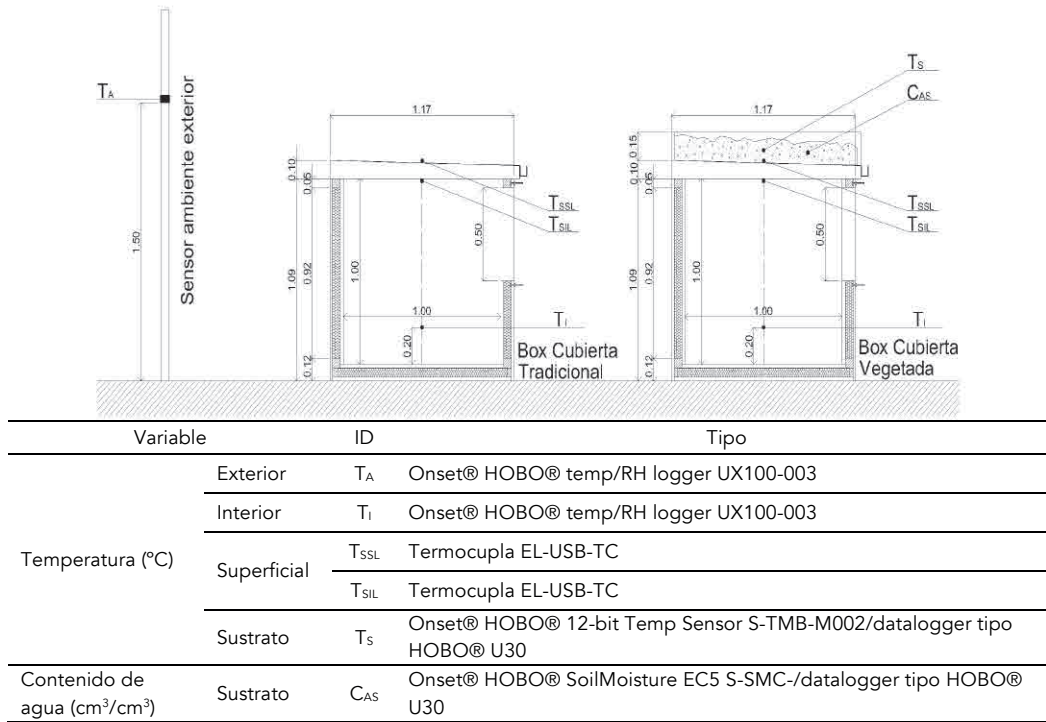


Figura 2. Método de medición e instrumental utilizado. Fuente: Elaboración de los autores.

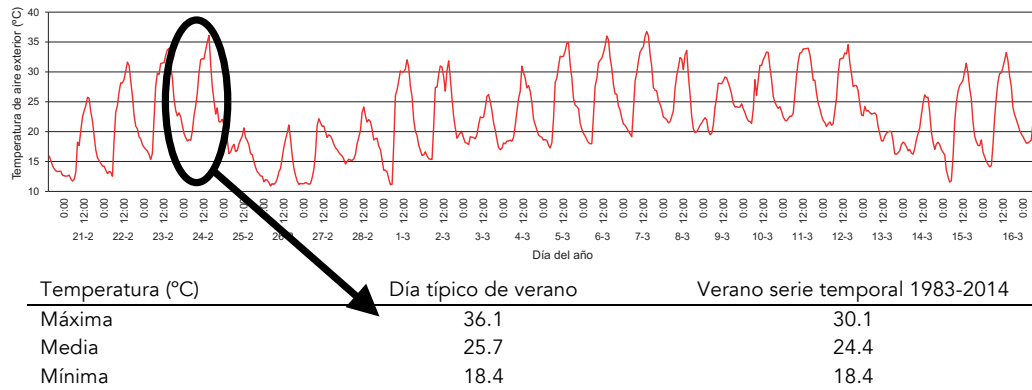


Figura 3. Periodo medido. Datos del día típico y de la serie temporal 1983-2014. Fuente: Elaboración de los autores.

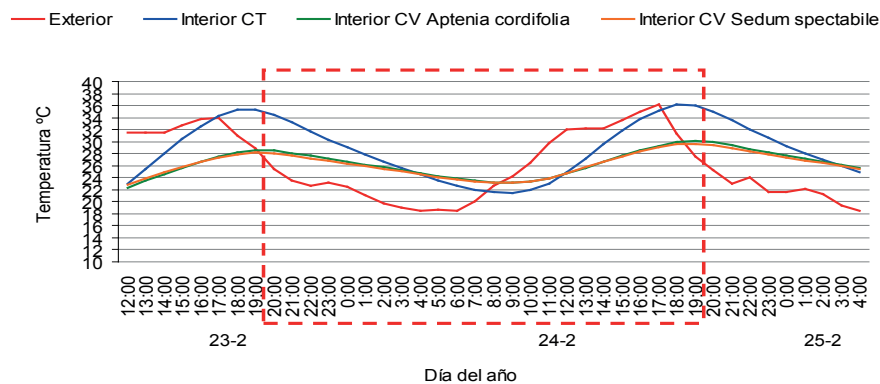


Figura 4. Comportamiento térmico del espacio interior. Fuente: Elaboración de los autores.

En el ambiente exterior se midió radiación solar total (W/m^2) con un piranómetro Star Pyranometer Mod3040-A Weather Tronic velocidad de viento (km/h) con un anemómetro Micro Response Anemometer Mod 2030 Weather Tronic. El almacenamiento de los datos se realizó en una memoria flash del tipo Secure Digital (SD).

RESULTADOS

Los datos obtenidos de las mediciones fueron promediados en forma horaria. La curva de temperatura exterior (Figura 3), en el periodo monitoreado, muestra un comportamiento inestable con diferencias en las temperaturas máximas y mínimas del orden de los $11^\circ C$ (máximas 20.6 a $36.8^\circ C$ y mínimas $11.2^\circ C$ a $22.6^\circ C$).

A efectos de tomar como unidad de estudio un día típico de verano, se compararon los datos medidos con los datos medios históricos para la serie temporal 1983-2014 correspondientes a la estación meteorológica CCT CONICET – Mendoza.

La contrastación de datos permitió seleccionar el día 23 de febrero con una diferencia en la temperatura media de $1.3^\circ C$ respecto a los datos medios históricos. Para dicho día se consideró el rango horario de 24 horas, comenzando a las 20:00h. El día elegido presenta condiciones de asoleamiento en días previos (Figura 3). Figura 3. Periodo medido. Datos del día típico y de la serie temporal 1983-2014. Fuente: Elaboración de los autores.

Los resultados se presentan en función de evaluar comparativamente las distintas variables para los módulos experimentales planteados mediante análisis térmico y análisis de correlación.

COMPORTAMIENTO TÉRMICO.

Los resultados obtenidos se analizan en forma comparativa para los tres módulos experimentales -CT, CV_{Ac} y CV_{Se} - en torno a la influencia de la cubierta de los mismos en la temperatura del aire del espacio interior, temperatura superficial de la losa, y temperatura y contenido de agua del sustrato.

ESPACIO INTERIOR.

Temperatura del aire.

La Figura 4 muestra el comportamiento de la temperatura exterior y la del aire interior en cada uno de los módulos de ensayo. Se observa un retardo entre las temperaturas máximas y mínimas en el interior de cada uno de las cubiertas verdes respecto a la temperatura exterior equivalente a 3 horas durante el calentamiento y a 5 horas durante el enfriamiento, lo cual evidencia el efecto de la tecnología verde en la temperatura interior.

Es notable la diferencia de la amplitud térmica entre el exterior y el interior de cada uno de los módulos. Su valor es superior a $3^\circ C$ en CT y alcanza una diferencia de 10 a $11^\circ C$ en los módulos CV_{Ac} y CV_{Se} (Tabla 2).

Al considerar la magnitud del retardo y el valor de la temperatura interior entre los picos y valles de las curvas, se presentan diferencias que manifiestan el efecto particular de cada cubierta verde respecto de la temperatura interior del CT. Mientras la amplitud térmica de la temperatura interior en los módulos con cubierta verde está atenuada -6 a $7^\circ C$ -, se aprecia una diferencia importante respecto a la amplitud térmica de la temperatura interior del TT $-14^\circ C$ - y respecto a la del ambiente $-17^\circ C$ - (Tabla 2).

Tabla 2. Temperatura y amplitud térmica. Fuente: Elaboración de los autores.

Temperatura ($^\circ C$)	Interior			
	CT	CV_{Ac}	CV_{Se}	
Mínima	18.4	21.5	23.2	23.1
Media	25.7	28.1	26.2	26.0
Máxima	36.1	36.1	30.1	29.7
Amplitud térmica	17.7	14.6	6.9	6.6

La temperatura media interior del módulos testigo es $2.5^\circ C$ superior a la media exterior y las temperaturas medias de los módulos CV_{Ac} y CV_{Se} son semejantes entre sí y a la exterior, pero inferiores respecto al testigo con cubierta tradicional, en un rango de 1.9 - $2.1^\circ C$ (Tabla 2).

La temperatura máxima en el interior de CT es igual a la exterior. Al comparar las temperaturas máximas interiores entre módulos con cubierta verde respecto al módulo testigo con cubierta tradicional, se observa que CV_{Ac} se encuentra $6.0^\circ C$ por debajo de CT y CV_{Se} $6.5^\circ C$ (Tabla 2).

Al comparar los módulos CV_{Ac} y CV_{Se} , se advierte que las mayores temperaturas se dan en CV_{Ac} , aunque las diferencias entre valores medios, mínimos, máximos y amplitud térmica, son despreciables y del orden de $0.2^\circ C$, $0.1^\circ C$, $0.5^\circ C$ y $0.4^\circ C$, respectivamente (Tabla 2).

LOSA

Temperatura superficial.

La curva de la temperatura superficial en la cara exterior de la losa, en CT, muestra un comportamiento similar a la temperatura exterior con un desfase horario de una hora, tanto en el periodo de enfriamiento (desde las 20:00 h. hasta las 07:00 h.) como en el periodo de calentamiento (desde las 07:00 h. hasta las 20:00 h.). Alcanza una temperatura máxima de $35.3^\circ C$ y una mínima de $18.6^\circ C$. La cara inferior presenta mayores temperaturas respecto a la cara superior, alcanzando un valor máximo de $39.3^\circ C$ y un mínimo de $21.9^\circ C$. Las mayores temperaturas inferiores resultan del efecto combinado de la ganancia térmica y la inercia de la envolvente -paramentos verticales y horizontales- (Figura 5).

Las temperaturas encaras superior e inferior de la losa en los módulos con cubiertas verdes son significativamente menores a los alcanzados en CT, semejantes entre sí y homogéneas. Alcanzan temperaturas que oscilan entre $22^\circ C$

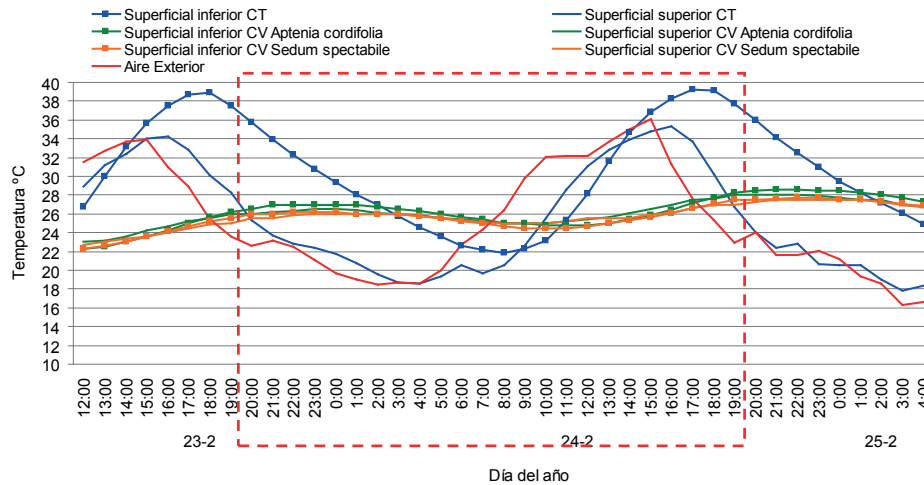


Figura 5. Temperatura superficial de la losa. Fuente: Elaboración de los autores.

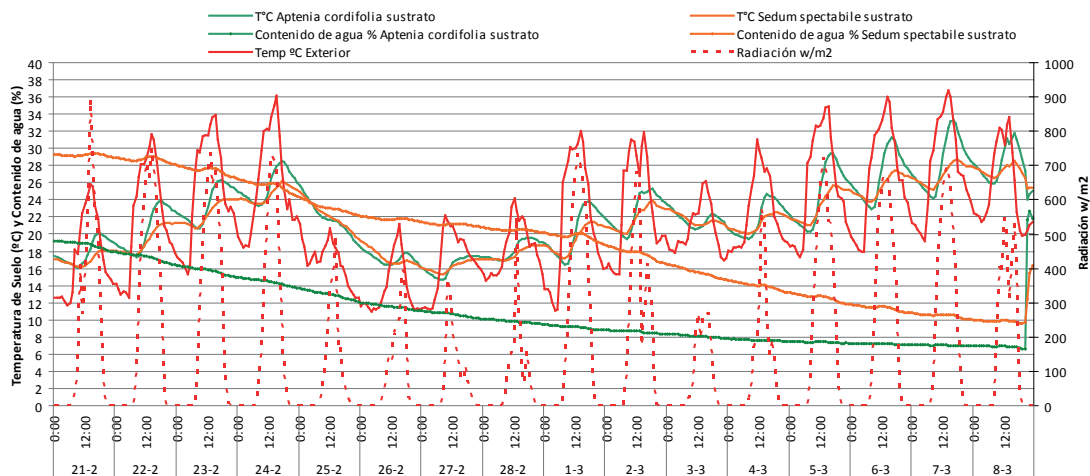


Figura 6. Temperatura y contenido de agua del sustrato: período entre riegos y día típico. Fuente: Elaboración de los autores.

y 29°C (amplitud térmica 7°C). El comportamiento térmico en CV_{Ac} presenta temperaturas máximas superficiales levemente mayores en la cara superior de la losa (26.5°C) respecto al CV_{Se} (26.0°C) y semejantes en las temperaturas mínimas (25.0°C). Esta leve diferencia en las temperaturas máximas se debe a las características propias de las especies en estudio (Figura 5).

Las temperaturas superficiales de la cara inferior de la losa son mayores a las de la superior en el periodo de enfriamiento (de 21:00 h. a 12:00 h.) y menores en el periodo de calentamiento (de 12:00 h. a 21:00 h.). Al igual que en el módulos CT, este comportamiento se debe al efecto de la ganancia térmica y la inercia de la losa de hormigón (Figura 5).

SUSTRATO

Temperatura y contenido de agua (Figura 6).

El contenido de agua del sustrato ha sido analizado para un periodo de 16 días con condición estable, es decir, un lapso entre dos riegos sucesivos sin aporte de precipitaciones. Este criterio se sustenta en que la variable cumple un ciclo entre dos riegos debido a las propiedades físicas del sustrato-textura y estructura-, cuyo comportamiento está asociado a la variación diaria de la humedad en función de aportes de agua, variables meteorológicas y la influencia del sistema radical de las plantas.

CV_{Ac} presentó un menor rango de variabilidad de contenido de agua del sustrato, entre 6.9 y 19.2% -amplitud 12.3%-, en cambio, CV_{Se} exhibió un rango de 10.0 a 29.3% -amplitud 19.3%-.

Tabla 3. Matriz de correlaciones canónicas para CVAc. Fuente: Elaboración de los autores.

		Temperatura (°C)					Radiación (W/m ²)	Velocidad viento (Km/h)
		Sustrato	Superficial superior	Superficial inferior	Interior	Exterior		
Temperatura (°C)	Sustrato	1.00	0.93	0.89	0.96	0.67	0.14	0.15
	Superficial superior	0.93	1.00	0.99	0.94	0.43	-0.11	0.01
	Superficial inferior	0.89	0.99	1.00	0.94	0.34	-0.21	-0.06
	Interior	0.96	0.94	0.94	1.00	0.54	-0.06	0.07
	Exterior	0.67	0.43	0.34	0.54	1.00	0.72	0.51
Radiación W/m ²		0.14	-0.11	-0.21	-0.06	0.72	1.00	0.65
Velocidad viento Km/h		0.15	0.01	-0.06	0.07	0.51	0.65	1.00

Tabla 4. Matriz de correlaciones canónicas para CVSe. Fuente: Elaboración de los autores.

		Temperatura (°C)					Radiación (W/m ²)	Velocidad viento (Km/h)
		Sustrato	Superficial superior	Superficial inferior	Interior	Exterior		
Temperatura (°C)	Sustrato	1.00	0.99	0.98	0.95	0.53	0.00	0.08
	Superficial superior	0.99	1.00	1.00	0.92	0.41	-0.11	0.01
	Superficial inferior	0.98	1.00	1.00	0.94	0.38	-0.16	-0.02
	Interior	0.95	0.92	0.94	1.00	0.57	-0.02	0.10
	Exterior	0.53	0.41	0.38	0.57	1.00	0.72	0.51
Radiación W/m ²		0.00	-0.11	-0.16	-0.02	0.72	1.00	0.65
Velocidad viento Km/h		0.08	0.01	-0.02	0.10	0.51	0.65	1.00

Tabla 5. Matriz de correlaciones canónicas para CT. Fuente: Elaboración de los autores.

		Temperatura (°C)				Radiación (W/m ²)	Velocidad viento (Km/h)
		Superficial superior	Superficial inferior	Interior	Exterior		
Temperatura (°C)	Superficial superior	1.00	0.08	0.06	0.08	0.04	-0.06
	Superficial inferior	0.08	1.00	0.97	0.75	0.26	0.28
	Interior	0.06	0.97	1.00	0.61	0.04	0.14
	Exterior	0.08	0.75	0.61	1.00	0.72	0.51
Radiación W/m ²		0.04	0.26	0.04	0.72	1.00	0.65
Velocidad viento Km/h		-0.06	0.28	0.14	0.51	0.65	1.00

Las curvas que representan el contenido de agua del sustrato muestran un comportamiento diferenciado respecto a la cantidad volumétrica del mismo, y semejante respecto a la pendiente que representa la disminución del contenido hídrico en el suelo entre los días 21 y 28 de febrero. La velocidad de disminución de contenido de agua para ambas especies es constante hasta el 1 de marzo, alcanzando valores de 10% para CV_{Ac} y 21% para CV_{Se} . Los rangos en los que varía el contenido hídrico es de 9.7% para CV_{Ac} ($\Delta H_{CV_{Ac}}$) y de 9,1% para CV_{Se} ($\Delta H_{CV_{Se}}$). A partir de estos valores, el comportamiento de las especies se diferencia de la siguiente forma: CV_{Ac} disminuye la velocidad de descenso de la humedad, mientras que CV_{Se} la aumenta, poniendo de manifiesto las distintas capacidades de absorción de las especies en estudio ($\Delta H_{CV_{Ac}}=1.9\%$; $\Delta H_{CV_{Se}}=8.8\%$).

En el periodo comprendido entre riegos, las curvas que reflejan las temperaturas del sustrato muestran un comportamiento amortiguado respecto de la temperatura exterior. La temperatura máxima y la amplitud térmica del sustrato del CV_{Se} son menores (máx. media 23.9°C, amplitud media 3.1°C) respecto al CV_{Ac} (máx. media 26.1°C, amplitud media 5.9°C). Las temperaturas mínimas medias alcanzadas son similares (20.9°C CV_{Ac} , 20.2°C CV_{Se}).

Para el día típico, la temperatura exterior oscila en un rango de 25.7°C, con un máximo de 36.1°C y un mínimo de 18.4°C. La temperatura de sustrato presenta una amplitud térmica de 5.2°C para CV_{Ac} (máx. 28.5°C y mín 23.3°C) y de 2.6°C para CV_{Se} (máx. 26.1°C y mín. 23.5°C). La máxima de la temperatura exterior se presenta en forma desfasada con los valores máximos de radiación solar. Sin embargo, la temperatura máxima del sustrato coincide con la máxima de la temperatura exterior. Las magnitudes se encuentran atenuadas 10.0°C para CV_{Se} y 7.6°C para CV_{Ac} . Estos comportamientos evidencian la capacidad del paquete biológico de regular la temperatura exterior.

La temperatura del sustrato aumenta a medida que la cantidad de agua disminuye, lo que demuestra la incidencia del contenido hídrico sobre la inercia térmica del sustrato.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS.

Los datos obtenidos se analizaron con InfoStat, un software para análisis estadístico de aplicación general desarrollado bajo la plataforma Windows (Universidad Nacional de Córdoba, 2008). Se realizó una matriz de correlaciones canónicas para análisis multivariado, con el objeto de evaluar la correlación entre la temperatura interior y las variables independientes que influyen sobre la magnitud de la misma (Tablas 3, 4 y 5).

La temperatura interior en los módulos CV_{Ac} y CV_{Se} depende de la temperatura del sustrato, alcanzando valores de correlación superiores a 0.9 en ambas especies. La temperatura del sustrato (paquete biológico) se correlaciona con la temperatura exterior (0.67 CV_{Ac} , 0.53 CV_{Se}) y ésta depende de la radiación solar (0.72) y de la velocidad de viento (0.51). Si bien radiación y velocidad de viento se correlacionan estadísticamente con la temperatura exterior, no lo hacen directamente con ninguno de los estratos que forman parte del camino que debe atravesar el flujo de calor hacia el interior de los módulos experimentales. Por lo tanto, el análisis estadístico indicaría que la influencia de la temperatura exterior sobre la interior es indirecta.

Las relaciones entre variables descriptas previamente muestran que la temperatura interior depende del paquete biológico y éste de la temperatura exterior, por tanto, la respuesta térmica de las tecnologías verdes en espacios interiores depende de la condición climática del sitio de emplazamiento.

El comportamiento térmico en el interior de los módulos con cubiertas verdes se correlaciona con la temperatura superficial de la losa de hormigón en ambas caras -con valores de correlación superiores a 0.9-. Esto parecería indicar que la tecnología de la cubierta tiene influencia sobre la temperatura interior en espacios que han incorporado tecnologías verdes.

La temperatura interior del CT muestra mayor dependencia de la temperatura exterior -0.61-, que la de los módulos con cubierta verde -0.54 para CV_{Ac} y 0.57 para CV_{Se} -.

CONCLUSIONES.

De los resultados obtenidos mediante los ensayos experimentales se puede concluir que en un día típico de verano en la ciudad de Mendoza, el uso de tecnologías verdes sobre techos planos permite disminuir la amplitud térmica interior alrededor de 8°C y la temperatura máxima, 6°C. El mismo efecto se observa en la temperatura media interior, que decae al menos 2°C con el uso de cubiertas verdes, respecto a un techo tradicional sin vegetar.

La reducción de la temperatura en espacios interiores contribuye a moderar los consumos de energía en el ambiente construido. Estudios previos muestran que en viviendas con tecnologías de envolvente másica, disminuciones de temperatura del orden de 1°C aminoran en un 27% los consumos de energía derivados de la necesidad de enfriamiento para alcanzar condiciones de confort. Esto implica que pequeñas diferencias de temperatura generan un alto impacto en la demanda energética para el acondicionamiento térmico de espacios interiores (Cantón y Fernández, 2010).

Los comportamientos térmicos entre los módulos de ensayo con diferentes especies vegetales -*Sedum spectabile*, *Aptenia cordifolia*- muestran diferencias poco significativas. Las temperaturas máximas alcanzadas en el interior de los módulos difieren en 0.5°C. Ello significa que es necesario ampliar el universo de especies en estudio para identificar mayores rangos de eficiencia. Además, el criterio de selección de especies en zonas áridas debe asociarse principalmente a la demanda hídrica y la disponibilidad local. De las especies estudiadas, *Aptenia cordifolia* muestra ser una especie compatible con esta condición (*Aptenia* sp. 268 litros.m²/año; *Sedum* sp. 291 litros.m²/año).

La temperatura superficial en la cara externa de las losas en los módulos con cubiertas verdes exhibe condiciones de estabilidad, siendo su amplitud térmica 13°C menor respecto al módulo testigo. La temperatura máxima superficial es del orden de 34°C en el módulo testigo y de 26°C en los módulos con cubiertas verdes. Desde el punto de vista tecnológico, la reducción de la amplitud térmica representa un beneficio asociado al aumento de la vida útil de la aislación, debido a su exposición a condiciones térmicas más favorables (Jaffal, Ouldboukhitine y Belarbi, 2012).

Los resultados alcanzados respecto a la temperatura y contenido de agua del sustrato evidencian que a mayor contenido de agua es mayor la estabilidad térmica. Este comportamiento se observa en la cubierta vegetada con *Sedum spectabile* donde el mayor calor

específico del agua respecto del aire, provoca que la ganancia térmica modifique en menor medida la temperatura del sustrato. El uso de especies que conservan mayor contenido de agua en el sustrato permite mayor inercia térmica en el mismo, logrando un beneficio con respecto al aislamiento térmico hacia el interior. La especie *Sedum spectabile* demostró un comportamiento más dinámico respecto a la tasa de absorción de agua. Las desiguales tasas de absorción se deben a diversos factores: características fisiológicas diferenciales según especies, distinta estructura del sustrato debido al sistema radical de cada especie y disímiles requerimientos hídricos.

El paquete biológico en un día representativo de verano se comporta como un aislante, disminuyendo las temperaturas máximas exteriores a nivel de sustrato en más de 7°C y la amplitud térmica en más de 12°C con respecto a la exterior.

Los resultados del tratamiento estadístico de los datos indican que el comportamiento térmico de espacios interiores con cubiertas verdes está correlacionado con la temperatura superficial de la losa en la cara superior e inferior, y éstas, a su vez, con la temperatura del paquete biológico. Mientras que dicha temperatura está asociada al contenido hídrico del sustrato y a la temperatura exterior. Esto demuestra que intervenir sobre el diseño y los componentes de la cubierta verde permite desarrollar diferentes estrategias para regular el desempeño térmico de los espacios interiores en función del clima en el cual se inserta la tecnología.

Un análisis crítico de la cubierta verde revela que:

-respecto al sustrato y atendiendo a la sustentabilidad del sistema, su viabilidad está asociada al bajo peso específico (que permita controlar la sobrecarga en la estructura edilicia), a la disponibilidad local y al bajo costo, en la medida en que se busca propiciar un sistema posible de ser implementado en forma masiva.

-respecto a las especies, si bien aquellas empleadas en cubiertas verdes a nivel internacional pertenecen en su mayoría al género *Sedum*, bajo condiciones de clima árido, la tendencia de uso debiera orientarse a especies nativas o adaptadas para asegurar la cobertura vegetal (Klein y Coffman, 2015). En este sentido, es pertinente atender al uso de especies vegetales adaptadas al rigor climático local y de alta disponibilidad regional, como es el caso de *Aptenia cordifolia*.

AGRADECIMIENTOS.

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICET) y a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCYT) la financiación recibida para el desarrollo de esta investigación. Así también a las Empresas SIKA ARGENTINA y SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS S.A. por sus contribuciones al desarrollo de ensayos experimentales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDRI, Eleftheria y JONES, Phil. Temperature decreases in as urban canyon due to green walls and green roof in diverse climates. *Building and Environment-Elsevier*, 2008, n° 43, pp.480-493.

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

CAMERON, Ross W. F.; TAYLOR, Jane E. T. y EMMETT, Martin R. What's 'cool' in the world of green façades? How plant choice influences the cooling properties of green walls. *Building and Environment*, 2014, n° 73, pp. 198-207.

CANTÓN, María Alicia y FERNÁNDEZ, Jorge. Efecto de los toldos en las condiciones térmicas del espacio abierto y su influencia en los interiores en zonas áridas. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 2010, n° 26, pp. 1-8.

CLARCK, James R. y MATHENY, Nelda P. A model of Urban Forest Sustainability: Application to Cities in the United States. *Journal of Arboriculture*, 1998, vol. 24, n° 2, pp. 112-120.

FLORES ASIN, Juan Emiliano; MARTÍNEZ, Claudia Fernanda y CANTÓN, María Alicia. 2013. Tecnologías verdes. Potencial de aplicación en el área metropolitana de MENDOZA (AMM). En: *Acta de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente (22 al 25 de octubre de 2013)*. Tucumán, Argentina, 2013, pp.05.115-05.120.

GONZÁLEZ LOYARTE, María Margarita; MENENTI, Massimo y DIBLASI, Ángela M. Mapa bioclimático para las Travesías de Mendoza (Argentina) basado en la fenología foliar. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias – Universidad Nacional de Cuyo*, 2009, n° 41, pp. 105-122.

JAFFAL, Issa; OULDBOUKHITINE, Salah-Eddine y BELARBI, Rafik. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy-Elsevier*, 2012, n° 43, pp. 157-164.

KLEIN, Petra M. y COFFMAN, Reid. Establishment and performance of an experimental green roof under extreme climatic conditions. *Science of the Total Environment-Elsevier*, 2015, n° 512-213, pp. 82-93.

LA ROCHE, Pablo. Low Cost Green Roofs for Cooling: Experimental series in a hot and dry climate. En: *PLEA2009 (22-24 June 2009) - 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture* [en línea]. Quebec City, Canada, 2009. [Consultado 10 diciembre 2016]. Disponible en: <http://www.plea2009.arc.ulaval.ca/Papers/2.STRATEGIES/2.2%20Heating%20and%20Cooling/ORAL/2-2-17-PLEA2009Quebec.pdf>

QIU, Guo-yu; LI, Hong-yong; ZHANG, Qing-tao; CHEN, Wan; LIANG, Xiao-jian y LI, Xiang-ze. Effects of Evapotranspiration on Mitigation of Urban Temperature by Vegetation and Urban Agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, n° 12, pp. 1307-1315.

ROSENZWEIG, Cynthia; SOLECKI, William D.; PARSHALL, Lily; LYNN, Barry; COX, Jennifer; GOLDBERG, Richard; HODGES, Sara; GAFFIN, Stuart; SLOSBERG, Ronald B.; SAVIO, Peter; DUNSTAN, Franky WATSON, Mark. Mitigating New York city's heat island. Integrating stakeholder perspectives and scientific evaluation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, vol. 9, n° 90, pp. 1297-1312.

Universidad Nacional de Córdoba (UNC). *Programa Estadístico InfoStat* [en línea]. 2008. [Consultado 2 junio 2015]. Disponible en: <http://www.infostat.com.ar>.