

Cubiertas verdes en zonas áridas. Su eficiencia como estrategia de ahorro energético en verano e invierno.

J. Emiliano Flores Asin¹, Claudia F. Martinez¹, M. Alicia Cantón¹, Erica N. Correa¹

Resumen

Los techos vegetados constituyen estrategias de enverdecimiento que a escala edilicia controlan las altas temperaturas estivales en espacios interiores y a escala urbana contribuyen a mitigar el fenómeno isla de calor. Este trabajo evalúa, el efecto de cubiertas vegetadas con especies adaptadas -*Aptenia cordifolia*, *Sedum spectabile*- a climas cálido-secos sobre el comportamiento térmico de espacios interiores y su consecuente ahorro energético. Metodológicamente se ha monitoreado el desempeño térmico durante verano e invierno en tres box experimentales -uno con cubierta tradicional y dos vegetados-. Los resultados indican que las cubiertas vegetadas en verano disminuyen la temperatura interior 1,6 °C generando ahorros medios de energía para refrigeración del 30-35 %. En invierno si bien no hay variaciones notables, se observan ahorros energéticos diurnos del 2-4 %. El diseño de esta tecnología requiere evaluarse a nivel local para maximizar su eficiencia energética y garantizar la sustentabilidad urbano-edificio según los recursos y tecnologías disponibles.

Palabras clave: Techos verdes, Comportamiento térmico, Ahorro energético, Zonas áridas.

Green Roofs in Arid Cities. Efficiency as Energy Saving Strategy in Summer and Winter.

Abstract

Green roofs are greening strategies that controls the high summer temperatures in the indoor spaces at building scale and help mitigate the heat island phenomenon in urban scale. This work evaluates the effect of vegetated roofs with adapted species -*Aptenia cordifolia*, *Sedum spectabile*- in warm-dry climate in relation to the thermal behavior of indoors spaces and the consequent energy savings. Methodologically the thermal performance during summer and winter has monitored, in three experimental boxes- one with a traditional roof and two with vegetated roofs-. The results indicate that in the green roofs, indoor summer temperature decreases of 1,6 °C generate energy savings for refrigeration of 30 to 35%. In winter, although there are not notable variations, diurnal energy savings of 2-4% is observed. The design of these new technologies should be assessed at local level to

¹ Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE CCT CONICET Mendoza). Av. Ruiz Leal, s/n. Parque General San Martín, Ciudad de Mendoza, Argentina. Tel: +54-261-524-4310. e-mail: eflores@mendoza-conicet.gob.ar

maximize energy efficiency and ensure urban-building sustainability according to resources and technologies available.

Palabras clave: Green Roofs, Thermal Behavior, Energy Savings, Arid Cities.

Introducción

En ciudades de elevada antropización, el sellamiento de suelos, el uso de materiales inadecuados en envolventes edilicias y el calor generado por motores de combustión, principalmente, ocasionan una diferencia de temperatura entre el espacio urbano y el espacio circundante no urbano, que se denomina efecto de isla de calor urbano (ICU) (Alchapar y Correa, 2013). El aumento de temperatura en zonas urbanas derivado del fenómeno de ICU provoca un mayor consumo energético destinado a refrigeración para el acondicionamiento térmico de edificios. El uso eficiente de la energía es uno de los pilares de la sostenibilidad urbana en ciudades consolidadas y la aplicación de políticas para tal fin tiene suma relevancia en un contexto de aumento de su demanda debido al crecimiento económico e industrial y a mayores exigencias de habitabilidad (Rosenfeld et al., 2007; Cárdenas, 2011).

La incorporación de estrategias de mitigación del efecto de ICU, en un contexto de planificación urbana, colaborará a que la temperatura en las ciudades se aproxime al rango de confort para el ser humano, evitando que luego se deba consumir mayor cantidad de energía para contrarrestar este fenómeno. La valoración de la sustentabilidad urbana deja de manifiesto el rol de la vegetación (Pincetl, 2012), ya que la misma puede reducir las temperaturas urbanas de 0,5 a 4,0 °C (Qiu et al., 2013). Una de las principales estrategias de mitigación de ICU es la incorporación de espacios verdes en vacíos urbanos a través de parques, plazas, arbolado de alineación vial, patios y nuevas tecnologías como muros y techos vegetados. Las nuevas tecnologías verdes, permiten la incorporación de vegetación a envolventes edilicias en ciudades consolidadas donde no se cuenta con vacíos urbanos disponibles para otro tipo de estructura verde tradicional. Estudios previos han demostrado que dependiendo del clima de la región y de la cantidad de vegetación, la economía de energía que generan estas tecnologías, varía entre un 35-95% (Alexandri y Jones, 2006).

A nivel internacional, la incorporación de nuevas tecnologías verdes está en auge, ya que impacta en la reducción de los efectos del calentamiento global, la contaminación atmosférica y el nivel de ruidos, como también en la disminución del efecto de la ICU y en el acondicionamiento térmico edilicio, con la consecuente disminución de los consumos de energía (Dunnet y Kingsbury, 2004; Wonga et al., 2009). Si bien en Europa y América del Norte estas tecnologías ya están siendo aplicadas, su incorporación a los contextos locales se encuentra aún en fase de experimentación.

En Argentina, el interés por estas tecnologías se ha incrementado desde el 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. Dicha ley menciona que los propietarios de edificaciones que implementen y mantengan techos verdes, gozarán de una reducción de hasta el 20% las tasas de alumbrado, barrido y limpieza. Tal estímulo promueve el uso de la tecnología y colabora al metabolismo urbano trayendo grandes beneficios a nivel urbano. Sin embargo, su implementación requiere evaluar el desempeño termo-energético en la zona.

En particular, a nivel local la mayor parte del territorio de la provincia de Mendoza se ubica integrando el mosaico mundial de las Zonas Áridas. La incorporación de vegetación en estas zonas

presenta condicionantes específicas: alta insolación y amplitud térmica; baja precipitación y humedad relativa. Por ende, la manutención de espacios verdes depende de riego artificial.

En el Área Metropolitana de Mendoza (AMM) resultados de mediciones en prototipos experimentales indican que en espacios interiores a la cubierta vegetada, disminuciones de temperatura de 1,5 a 1,6 °C generarían ahorros de energía eléctrica destinada a refrigeración del orden del 32% al 34% en la estación de verano (Flores Asin et al., 2015). Otros autores han evaluado el comportamiento térmico de las cubiertas vegetadas en la estación invierno determinando que la temperatura en el sustrato es 7 a 8 °C más elevada que la temperatura alcanzada en cubiertas tradicionales y sus consecuentes ahorros energéticos destinados a calefacción (Teemusk y Mander, 2010).

Para el AMM, emplazada en un contexto árido, se plantea la necesidad de avanzar en el estudio y desarrollo de sistemas de naturación urbana que empleen especies de bajo consumo hídrico, y que permitan un apropiado acondicionamiento térmico. El potencial de incorporación de nuevas tecnologías verdes es elevado en la alta densidad constructiva de la ciudad capital -61%- (Flores Asin et al., 2013). La aplicación de estas tecnologías -con adaptación a restricciones hídricas- permitiría incorporar masa vegetal al espacio urbano-edificio y contribuiría al ahorro energético.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto de cubiertas vegetadas en el comportamiento térmico de espacios interiores y su consecuente ahorro energético, en verano e invierno en zonas de clima cálido-seco.

Metodología




1. Diseño experimental

El diseño experimental sigue la metodología propuesta por La Roche (2009) y tiene por objeto analizar en forma comparativa la influencia de cubiertas tradicionales y de cubiertas vegetadas adaptadas a los condicionantes locales, sobre el comportamiento térmico de espacios interiores. A tal fin, en el área experimental del CCT CONICET Mendoza (latitud 32°53'52.83"S, longitud 68°52'31.30"O) se montaron tres box de ensayo: un box testigo con cubierta tradicional sin vegetar (CT) y dos box con cubiertas vegetadas con distintos paquetes biológicos (denominadas CV1 y CV2).

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

La cubierta vegetada está definida por un manto drenante Sika® GR Aquadrain Extensivo, un sistema de riego por goteo subsuperficial, sacos de geotextil (3) contenedores del sustrato (arena, orujo agotado y turba negra en iguales proporciones; espesor 150 mm) y las especies vegetales. En este trabajo se evalúan dos especies de disponibilidad local y alta tasa de reproducción agámica: *Aptenia cordifolia* (L. f.) Schwant. "Baby rose" y *Sedum spectabile* (Boreau) H. Ohba "Sedum otoño" (Fig. 1).

Figura 1: Diseño Experimental.

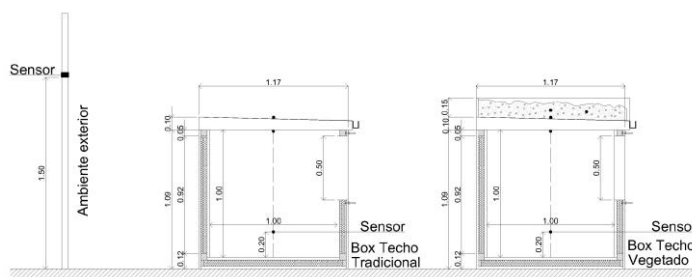
Características de las especies vegetales evaluadas.		Cubierta vegetada <i>Aptenia cordifolia</i> (CV1)	Cubierta vegetada <i>Sedum spectabile</i> (CV2)	Cubierta testigo (CT)
				
Cobertura (%)	Verano	76,10	79,00	-
	Invierno	80,99	19,70	-
Consumo hídrico (litros.m ² /año)		268	291	-
Hábito de crecimiento		Rastrero	Erguida	-

Fuente: Figura realizada por el autor.

2. Método de medición

El diseño experimental tiene por objeto el desarrollo y monitoreo térmico de ensayos en condiciones controladas. El comportamiento térmico se evalúa a partir del registro de temperaturas -exterior e interiores- en las estaciones de verano e invierno durante periodos de 24 días. Los datos se registraron cada 15 minutos mediante microadquisidores de datos en la siguiente configuración: un sensor fijo del tipo Onset® HOBO® temp/RH logger UX100-003 en el espacio interior del box, dos sensores en la losa de hormigón -cara interna y externa- del tipo termocupla T EL-USB-TC con data logger incluido en cada una; y un sensor de referencia en el espacio abierto (Fig. 2).

Figura 2: Distribución de sensores de temperatura.



Fuente: Figura realizada por el autor.

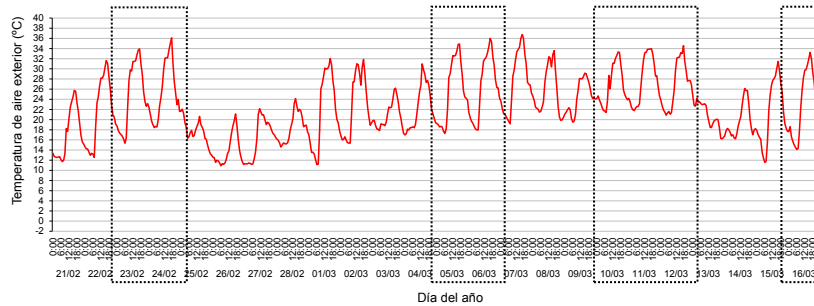
El cálculo de la demanda térmica se realiza mediante el método de grados-hora desarrollado por Erbs, et al. (1987).

Resultados

1. Selección de los días de análisis

1.1 Verano: Dentro de los 24 días que corresponden período de medición, para el análisis del comportamiento térmico y el cálculo de ahorro energético se consideraron 9 días típicos de verano (Figura 3), los cuales se presentan soleados, con una temperatura media de 26,07 °C (media histórica periodo de verano serie temporal de los años 1983 – 2014 de 24,36 °C) y una media de flujo de radiación de 709,1 W/m² - mínima 659,8 W/m², máxima de 739,7 W/m²-(amplitud 79,8 W/m²).

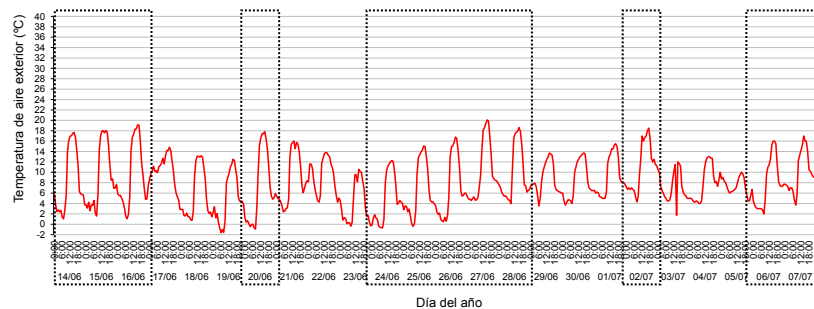
Figura 3. Periodo de medición estación VERANO.



Fuente: Figura realizada por el autor.

1.2 Invierno: Para el análisis del comportamiento térmico y el cálculo de ahorro energético en invierno, dentro de los 24 días del período de medición, se han considerado 12 días típicos (Figura 4). Dichos días se presentaron totalmente soleados con una temperatura media de 8,40 °C (media histórica periodo de invierno serie temporal de los años 1983 – 2014 de 8,90 °C) y una media de flujo de radiación de 456,4 W/m² -mínima 433,3 W/m², máxima 476,0 W/m²- (amplitud 42,7 W/m²).

Figura 4. Periodo de medición estación INVIERNO.



Fuente: Figura realizada por el autor.

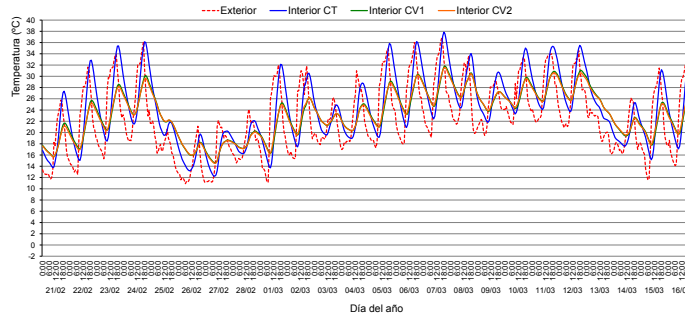
2. Comportamiento térmico

Los resultados obtenidos se analizan en forma comparativa para los tres tratamientos CT, CV1 y CV2 en torno a su comportamiento térmico y al potencial ahorro energético que implicaría su implementación masiva en áreas urbanizadas con clima local. Los datos fueron promediados en forma horaria para una mejor comprensión de los comportamientos globales.

2.1 Verano: Los valores de temperatura exterior en el ciclo de medición oscilaron en un rango comprendido entre 10,90 a 36,80 °C. La temperatura en el interior del box testigo -con cubierta tradicional- presenta una oscilación térmica de comportamiento similar aunque desfasada a la exterior con un máximo de 37,90 °C y un mínimo de 12,20 °C. En cambio, la temperatura en espacios conexos a cubiertas vegetadas presenta un rango de variabilidad de 14,50 a 31,80 °C (Figura 5). Se puede observar que la temperatura máxima interior en los box de ensayo se encuentra desfasada con respecto a la temperatura exterior debido a la masa térmica de la envolvente de los mismos. En días despejados, las temperaturas máximas y mínimas del box testigo -CT- son superiores a las exteriores en todo el ciclo de medición debido al efecto de ganancia solar y al carácter conservativo

resultante de la aislación de muros y pisos que limita la capacidad de enfriamiento del espacio interior durante la noche. Las curvas de temperatura de los box con cubiertas vegetadas -CV- se encuentran amortiguadas respecto a la temperatura exterior y al testigo.

Figura 5. Temperatura exterior e interior en la estación de VERANO



Fuente: Figura realizada por el autor.

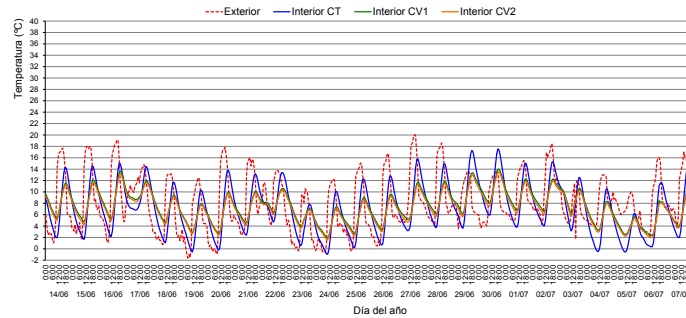
Para los días típicos de verano, la temperatura máxima exterior es similar a la interior en el box CT (35 °C) y muestra diferencias de 5,0 °C respecto a CV1 y CV2. La temperatura media exterior es semejante a CV1 y CV2, y menor respecto al tratamiento CT (1,8 °C). Las temperaturas mínimas en los box son superiores a la exterior debido al efecto de amortiguamiento térmico de la envolvente. Este efecto se acentúa en los tratamientos con cubierta vegetada, alcanzando diferencias respecto a la temperatura exterior de 4,6 °C. En consecuencia, se observa que los tratamientos con tecnología verde amortiguan la amplitud térmica notablemente (6 a 7 °C). Este efecto amortiguador es claramente observable en relación al box testigo cuya amplitud térmica es de 14,4 °C.

Tabla 1: Temperaturas medias exteriores e interiores para los 9 días de análisis en la estación de VERANO

Temperatura (°C)		Exterior	Interior		
			CT	CV1	CV2
Máx.		34,76	35,61	29,93	29,63
Med.		26,07	27,83	26,28	26,21
Mín.		18,48	21,19	23,06	23,05
ΔT		16,28	14,42	06,87	06,58

Fuente: Tabla realizada por el autor.

2.2 Invierno: Los valores de temperatura exterior en el ciclo de medición oscilaron en un rango comprendido entre -1,62 °C a 20,06 °C. La temperatura en el interior del box testigo -CT- presenta una oscilación térmica menor a la exterior (18,53 °C) con un máximo de 17,57 °C y un mínimo de -0,96 °C. En cambio, la temperatura en espacios conexos a cubiertas vegetadas presenta un rango de variabilidad de 1,60 °C a 14,02 °C (Figura 6). Queda de manifiesto al igual que en la estación de verano que la temperatura máxima interior en los box de ensayo se encuentra desfasada con respecto a la temperatura exterior. En días despejados, las temperaturas máximas del box testigo -CT- son inferiores a las exteriores en todo el ciclo de medición debido a la baja intensidad de radiación consecuencia de la altitud solar y la inercia de la losa de hormigón. Las temperaturas mínimas del box CT se encuentran por debajo de las temperaturas mínimas exteriores debido al efecto de la membrana que actúa como un material selectivo frío. Las curvas de temperatura de los box con cubiertas vegetadas -CV- se encuentran amortiguadas respecto a la temperatura exterior y al testigo debido a las características intrínsecas a la tecnología verde.

Figura 6. Temperatura exterior e interior en la estación de INVIERNO

Fuente: Figura realizada por el autor.

Al analizar los días típicos de invierno, se observa que la temperatura máxima exterior es mayor en 3,8 °C a la interior en el box CT, en cambio para las cubiertas vegetadas las temperaturas máximas interiores son menores respecto a la exterior en un valor de 6,6 °C a 6,9 °C, para CV1 y CV2 respectivamente. La temperatura media interior del box CT es menor a la exterior en 1,4 °C, en cambio para el box CV1 esa diferencia es de 1,2 °C y para CV2 es de 1,6 °C. La temperatura mínima presenta valores cercanos en el exterior (1,7 °C) como en el interior del box CT (1,6 °C). En cambio, los casos CV2 Y CV1 presentan mínimas de 3,8 a 4,2 °C superior al box CT, respectivamente. Estos resultados demuestran que las temperaturas mínimas medias son superiores en 2,2 a 2,6 °C con cubiertas vegetadas respecto a una cubierta tradicional, lo que demuestra su mejora en términos de transferencia de calor en la cubierta como parte de la envolvente, dotándola de características conservativas respecto a la energía en espacios interiores. La temperatura exterior presenta una amplitud térmica media de 15,5 °C. Al observar las amplitudes térmicas medias interiores se observa una diferencia de 3,3 °C entre el box CT respecto a la exterior. En cambio la amplitud térmica registrada en el interior de los box CV1 y CV2 es menor a la exterior y está en el orden de los 6,5 °C, en comparación a los 15,5 °C de la temperatura exterior. Esto demuestra la eficiencia del poder aislante de las cubiertas vegetadas como también se observó en la estación de verano (Tabla 1).

Tabla 2: Temperaturas medias exteriores e interiores para los 12 días de análisis en la estación de INVIERNO

Temperatura (°C)		Exterior	Interior		
			CT	CV1	CV2
	Máx.	17,24	13,74	10,68	10,38
	Med.	08,45	07,01	07,21	06,88
	Mín.	01,72	01,56	04,18	03,81
	ΔT	15,52	12,18	06,50	06,57

Fuente: Tabla realizada por el autor.

3. Potencial de ahorro energético

3.1. Verano: En los tres tratamientos, la temperatura promedio diaria interior para los 9 días de análisis alcanza valores de 27,83 °C en CT, 26,28 °C en CV1 y 26,21 °C en CV2. En todos los casos, dichas temperaturas se encuentran por encima de la temperatura de confort -23 °C- (Tabla 2). Los box CV1 y CV2 presentan una diferencia entre temperaturas medias del orden de 1,5 °C y 1,6 °C respecto al testigo (Tabla 3). Esto se debe al efecto de las cubiertas vegetadas en las temperaturas medias interiores. La variación leve de la temperatura media entre CV1 y CV2 se explica por las diferencias intrínsecas a las especies vegetales utilizadas.

Tabla 3: Impacto de las temperaturas exteriores en los espacios interiores en días típicos.

Día	T (°C) promedio diaria exterior	T (°C) promedio diaria interior			Δt diaria interior = CT-CV	
		CT	CV1	CV2	CT - CV1	CT - CV2
1	24,77	26,31	24,15	24,03	2,15	2,28
2	25,63	28,15	26,37	26,16	1,78	1,99
3	25,70	26,39	24,57	24,57	1,82	1,82
4	26,47	28,23	26,69	26,71	1,53	1,52
5	27,58	29,63	28,11	28,13	1,52	1,51
6	26,77	28,43	26,75	26,77	1,68	1,65
7	27,75	29,48	28,11	28,02	1,38	1,47
8	26,81	29,34	28,42	28,20	0,92	1,14
9	23,13	24,54	23,37	23,30	1,17	1,24
Promedio	26,07	27,83	26,28	26,21	1,55	1,62

Fuente: Tabla realizada por el autor.

Análisis hora-hora para el periodo de calentamiento y de enfriamiento

Con el fin de analizar comparativamente el comportamiento térmico y su consecuente ahorro energético en función de cada tratamiento y de la termofase del día, ya sea calentamiento o enfriamiento, se han realizado los cálculos correspondientes a los mismos.

La determinación del consumo energético derivado de la necesidad de enfriamiento o de calentamiento, se realiza mediante el cálculo de las diferencias de temperatura hora a hora para cada termofase (temperatura de confort 23 °C). Dichos valores fueron calculados para los 9 días de análisis. El cociente entre la sumatoria de diferencias de temperatura hora a hora para cada periodo permite definir los requerimientos de energía de CV1 y CV2 respecto al box testigo -CT- (Tabla 4).

Los resultados muestran que variaciones interiores de temperatura del orden de 1,25 °C generan ahorros de energía del 65% para CV1 en el periodo de calentamiento y variaciones de 1,76 °C generan ahorros de energía del 69% durante el enfriamiento (Tabla 4, Figura 6). En cambio para CV2, variaciones interiores de temperatura del orden de 1,08 °C generan ahorros de energía del 70% en el periodo de calentamiento y variaciones de 2,01 °C generan ahorros de energía del 65% durante el enfriamiento. De estos resultados se concluye que, aunque con pequeñas diferencias, el tratamiento CV1 demuestra ser más eficiente durante la noche y el tratamiento CV2 durante el día.

Tabla 4. Promedio de temperaturas horarias por termofase en días típicos de VERANO. Consumos energéticos relativos para CV1 y CV2.

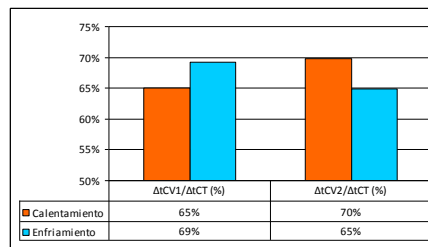
	T (°C) exterior	T (°C) interior			Δt interior = CT-CV		ΣΔtCT (°C)	ΣΔtCV1 (°C)	ΣΔtCV2 (°C)
		CT	CV1	CV2	CT - CV1	CT - CV2			
Calentamiento	30,31	26,58	25,33	25,50	1,25	1,08	322,25	209,53	225,05
Enfriamiento	23,03	28,73	26,96	26,72	1,76	2,01	721,81	499,46	468,18
							Σ 1044,06	708,99	693,23

Fuente: Tabla realizada por el autor.

El consumo energético, respecto al testigo (CT), muestra un consumo del 65% para el tratamiento CV1 y del 70% para CV2 para el periodo de calentamiento. En cambio, para el periodo de enfriamiento se puede observar –contrario al calentamiento- que el box CV1 (69%) presenta mayor eficiencia que el box CV2 (65%), lo que se debe a las características intrínsecas de cada especie vegetal (Figura 6). El consumo energético diferencial por especie y por periodo podría explicarse por lo siguiente: el hábito rastrero y compacto de la especie *Aptenia cordifolia* utilizada en CV1 podría

permitir la llegada de mayor cantidad de flujo radiativo solar que *Sedum spectabile* en CV2, y permitiendo una mayor transferencia térmica por conducción, menor eficiencia de día (mayor ganancia) como de noche (mayor capacidad de enfriamiento) respecto a *Sedum spectabile* que presenta hábito arbustivo y una condición abierta. Su morfología posibilitaría menor ganancia diurna por sombreado de la cubierta y menor intercambio radiativo y convectivo hacia la bóveda celeste debido a su porte arbustivo, dificultando el enfriamiento nocturno.

Figura 6. Consumo energético (%) de CV1 y CV2 relativo a CT en VERANO



Fuente: Figura realizada por el autor.

3.2. Invierno: En los tres tratamientos, la temperatura promedio diaria interior para los 12 días de análisis alcanza valores de 7,05 °C en CT, 7,11 °C en CV1 y 6,77 °C en CV2. En todos los casos, dichas temperaturas se encuentran por debajo de la temperatura de confort para la estación -18 °C- (Tabla 5). Los box CV1 y CV2 respecto al testigo presentan diferencias mínimas entre temperaturas medias del orden de 0,06 °C y 0,28 °C, respectivamente. Lo que indica que ambas cubiertas vegetadas presentan temperaturas medias similares a las del box CT. La variación leve de la temperatura media entre CV1 y CV2 se explica por las diferencias intrínsecas a las especies vegetales utilizadas.

Tabla 5: Impacto de las temperaturas exteriores en los espacios interiores en días típicos.

Día	T (°C) promedio diaria exterior	T (°C) promedio diaria interior			Δt diaria interior = CT-CV	
		CT	CV1	CV2	CT - CV1	CT - CV2
1	4,98	3,88	4,50	4,22	-0,61	-0,33
2	6,69	5,68	5,62	5,30	0,06	0,37
3	6,99	6,17	6,34	6,00	-0,17	0,17
4	10,18	8,37	7,94	7,52	0,43	0,84
5	9,76	8,90	8,86	8,45	0,04	0,45
6	9,30	8,90	9,46	9,02	-0,57	-0,12
7	11,02	9,15	9,35	8,93	-0,20	0,22
8	7,93	4,96	4,93	4,68	0,03	0,28
9	9,95	7,45	7,00	6,84	0,45	0,61
Promedio	8,53	7,05	7,11	6,77	-0,06	0,28

Fuente: Tabla realizada por el autor.

Análisis hora-hora para el periodo de calentamiento y de enfriamiento

Los consumos energéticos han sido determinados con el mismo criterio que para la estación de verano. En este caso se asume una temperatura de confort 18 °C. Dichos valores fueron calculados para los 12 días de análisis. El cociente entre la sumatoria de diferencias de temperatura hora a hora permite definir los requerimientos de energía de CV1 y CV2 respecto al box testigo -CT- (Tabla 6). Los resultados muestran leves diferencias de temperatura entre CV1 y CV2 en relación al testigo, para el calentamiento y el enfriamiento de - 0,25 y 0,36; respectivamente- (Tabla 6).

Tabla 6. Promedio de temperaturas horarias por termofase en días típicos de INVIERNO. Consumos energéticos relativos para CV1 y CV2.

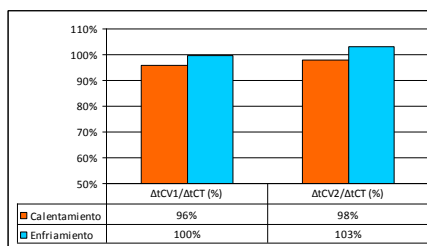
	T (°C) exterior	T (°C) interior			Δt interior = CT-CV		ΣΔtCT (°C)	ΣΔtCV1 (°C)	ΣΔtCV2 (°C)	
		CT	CV1	CV2	CT - CV1	CT - CV2				
Calentamiento	13,77	5,97	6,47	6,22	-0,51	-0,25	1167,28	1117,93	1142,64	
Enfriamiento	5,74	7,53	7,58	7,22	-0,04	0,31	1999,15	1990,64	2058,67	
							Σ	3166,43	3108,57	3201,31

Fuente: Tabla realizada por el autor.

El consumo energético, respecto al testigo (CT), muestra un consumo del 96% para el tratamiento CV1 y del 98% para CV2 para el periodo de calentamiento. Para el periodo de enfriamiento -al igual que en el periodo de calentamiento- se puede observar que el box CV1 (100%) presenta menor eficiencia que el box CV2 (103%). El consumo energético diferencial por especie y por periodo podría explicarse -como se mencionó en la estación de verano- por la arquitectura de ambas especies en las cubiertas vegetadas. El tratamiento CV1, vegetado con *Aptenia cordifolia*, permite la penetración de un flujo de calor hacia el interior, logrando mayor eficiencia de día que CV2 y no demuestra un comportamiento diferencial al tratamiento testigo durante la noche (periodo de enfriamiento), por lo cual su beneficio se registraría sólo durante el día. En cambio para CV2 se observa un ahorro energético menor a CV1 durante ambas termofases y durante la noche un consumo energético superior al del box CT (Figura 7). El comportamiento termo-energético de CV2 se explicaría por las características de la especie *Sedum spectabile*, la cual presenta su etapa de mayor crecimiento y desarrollo en primavera-verano y una etapa de senescencia y muerte de la parte aérea o dosel en otoño-invierno. La escasa cobertura -19,70 %- de esta especie en la estación invernal deja de manifiesto que al disponer la cubierta de mayor cantidad de suelo desnudo permitiría mayor intercambio radiativo y convectivo hacia la bóveda celeste, facilitando el enfriamiento nocturno y por ende, enfriando el interior aún más que una cubierta vegetada con mayor cobertura -CV1-.

El consumo energético de CV2 muestra un comportamiento conservativo debido al rol como aislante térmico de la cubierta vegetada durante la termofase de calentamiento en comparación al box testigo con un ahorro de energía de un 2%. Pero durante la noche -termofase de enfriamiento- el consumo energético de CV2 es superior en 3% al box CT. Esto último podría deberse a un balance térmico desfavorable para el comportamiento conservativo en el periodo de enfriamiento debido a la ausencia de la protección que lograría una mayor cobertura vegetal y a la mayor masa térmica – respecto al box CT- aportada principalmente por el sustrato que funcionaría como enfriador del espacio interior contrarrestando el beneficio del periodo de calentamiento.

Figura 7. Consumo energético (%) de CV1 y CV2 relativo a CT en INVIERNO



Fuente: Figura realizada por el autor.

Conclusiones

De los resultados obtenidos mediante ensayos experimentales se puede concluir que en la estación de verano, el uso de cubiertas vegetadas permite amortiguar las temperaturas en espacios interiores, con un consecuente ahorro energético. Las cubiertas vegetadas disminuyen la amplitud térmica interior alrededor de 7 °C y la temperatura máxima alrededor de 5 °C. Además, la temperatura media interior fue de 1,5 °C menor respecto a un techo tradicional sin vegetar. La disminución de la temperatura en espacios interiores contribuye a optimizar los consumos de energía. Diferencias en la temperatura interior del orden de 1,5-1,6 °C generan ahorros de energía para refrigeración del 30% al 35%. El ahorro es función de la termofase del día -calentamiento o enfriamiento- y de la especie vegetal que se utilice en la cubierta. Las termofases han sido analizadas en este trabajo en función de diferencias de temperatura, no en términos de la contribución relativa de cada uno de los mecanismos de transferencia de calor a la producción de tal efecto. En etapas futuras se pretende discernir el aporte de cada mecanismo de transferencia de calor al efecto global aquí presentado.

La cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia* demostró mejorar el confort térmico interior disminuyendo las temperaturas máximas y medias respecto a una cubierta tradicional. El aporte al confort térmico producto de esta cubierta vegetada -*Aptenia cordifolia*- se traduce en un ahorro energético del 35% de la energía que se debería destinar a refrigeración en el periodo de calentamiento y del 31% en el periodo de enfriamiento. Vegetar la cubierta con la especie *Sedum spectabile* permite un menor ahorro de energía durante el enfriamiento -30%- que con *Aptenia cordifolia*, si bien produce un significativo ahorro respecto a la cubierta tradicional sin vegetar. En cambio, en el periodo de enfriamiento, *Sedum spectabile*, presenta mejor comportamiento termo-energético que *Aptenia cordifolia*, logrando un ahorro del 35%. Estos resultados muestran la importancia de la selección de especies con el fin de optimizar el comportamiento termo-energético, según el uso, diseño y materialidad de la edificación a intervenir.

En la estación de invierno los beneficios son menores a los del verano y el comportamiento termo-energético depende de la especie utilizada. Con cubiertas vegetadas hubo una disminución de 8 °C en la amplitud térmica y un aumento de la temperatura mínima interior de al menos 2 °C. La temperatura media interior es similar en esta estación en los tres box de ensayo, ya sea con o sin cubierta vegetada. La cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia* presenta mayor ahorro energético para calefacción -4%- en el periodo de calentamiento, pero en el periodo de enfriamiento se comporta -en términos energéticos- del mismo modo que una cubierta tradicional sin vegetar. El comportamiento térmico de la cubierta vegetada con *Sedum spectabile* logra un ahorro de energía para calefacción en el periodo de calentamiento de 2% pero en el periodo de enfriamiento consume en su interior un 3% más que un espacio con cubierta tradicional. Lo cual, al igual que en verano, resalta la importancia del diseño de la tecnología con el fin de optimizar el comportamiento interior.

A nivel internacional se encuentran numerosos trabajos científicos de comportamiento térmico y energético de cubiertas vegetadas principalmente para zonas en las que no es necesario realizar aportes artificiales de agua. El aporte de este trabajo se circunscribe al contexto árido y las dificultades de seleccionar adecuadamente las especies a utilizar con su consecuente efecto termo-energético. El efecto estacional puede ser diferente con la misma especie, lo que valoriza el estudio local de diferentes especies y combinaciones de las mismas en distintas épocas del año.

Bibliografía

- Alchapar, N. y Correa E. (2013). Modificación de la reflectancia solar en la envolvente edilicia y su impacto sobre las temperaturas interiores. Revista AVERMA. Vol. 1, pp. 05. 69-05.78, 2013.
- Alexandri, E., Jones, P. (2006). Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roof in diverse climates. Science Direct – Elsevier Ltd
- Cárdenas, G. J. (2011). Matriz energética argentina. Situación actual y posibilidades de diversificación. Revista de la Bolsa de Comercio de Rosario. 32-36. <http://www.eeaoc.org.ar/upload/contenido/pdf/20120228122933000000.pdf>
- Dunnett, N.; Kingsbury, N. (2004). Planting Green Roofs and Living Walls. Timber Press Inc, Oregon.
- Erbs D.G. (1987). Degree Day for Variable Base Temperatures. Proceedings of International Solar Energy Society (ISES). Vol. N° 6, pp. 387-391. Ed. J. Hages and W. Kollar.
- Flores Asin, J. E., Martinez, C. F.; Cantón, M. A. (2013). Tecnologías verdes. Potencial de aplicación en el Área Metropolitana de Mendoza (AMM). Acta de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 1, pp. 05.115-05.120, 2013. ISBN 978-987-29873-0-5
- Flores Asin, J. E., Martinez, C. F.; Cantón, M. A. y Correa E. N. (2015). Impacto de cubiertas vegetadas en el ahorro energético del parque edilicio del área metropolitana de Mendoza (AMM). Acta de la XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 3, pp. 05.81-05.89, 2015. ISBN 978-987-29873-0-5
- La Roche, P. (2009). Low Cost Green Roofs for Cooling: Experimental series in a hot and dry climate. PLEA 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Quebec, Canada 22-24 June 2009.
- Pincetl, S. (2012). Nature, Urban Development and Sustainability – What New Elements are Needed for a More Comprehensive Understanding? Cities: Current Research on Cities, 29:S32-S37
- Qiu G., Li H., Zhang Q., Chen W., Liang X. y Li X. (2013). Effects of Evapotranspiration on Mitigation of Urban Temperature by Vegetation and Urban Agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*, nº 12, pp. 1307-1315.
- Rosenfeld E., San Juan G, Discoli C, Martini I, Ferreyro C, Barbero D. (2007) Ahorro de energía en el sector residencial. Su contribución a la disminución de gases de efecto invernadero (GEI). Revista AVERMA. Vol. 11: 07.31-07.38.
- Teemusk A, Mander U. (2010). Temperature regime of planted roofs compared with conventional roofing systems. *Ecol Eng* 2010; 36:91-105.
- Wonga, N. H.; Tan A. Y.; Tan, P. Y; Wongc, N.C. (2009). Energy Simulation of Vertical Greenery Systems. *Energy and Buildings*, Lausanne, v.41, n,12, p.1401-1408.

Autores

J. Emiliano Flores Asin es Ingeniero Agrónomo y becario doctoral ANPCyT. **Claudia F. Martinez** es Ingeniera Agrónoma, Doctora en Ciencias Biológicas e Investigadora Adjunta de CONICET. **M. Alicia Cantón** es Arquitecta, DAE en Arquitectura, Investigadora Independiente de CONICET y Profesora en FAUD-Universidad de Mendoza. **Erica N. Correa** es Ingeniera Química, Doctora en Ciencias - Área Energías Renovables, Investigadora Independiente de CONICET y Profesora en UTN-FRM.