

COMPARACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN CLIMATIZACIÓN DE UN EDIFICIO EDUCATIVO CON Y SIN TECHO VERDE. ESTUDIO DE SIMULACIÓN

Martín S. García¹, Natalia Muñoz², Luis I. Silva¹

¹Centro de Investigación y Transferencia Rafaela (CIT RAFAELA) – Universidad Nacional de Rafaela (UNRaf) – Bv. Roca 989, 2300 Rafaela

Tel. 03492-501155 e-mail: martin.garcia@unraf.edu.ar – luissilva@unraf.edu.ar

²Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro Provincia de Buenos Aires (CIFICEN), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires – Pinto 399, 7000 Tandil
e-mail: mmunoz@ifas.exa.unicen.edu.ar

RESUMEN: El ahorro de energía eléctrica en edificios se ha convertido en un desafío clave en busca de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático. En la última década, la instalación de techos verdes como estrategia ha avanzado fuertemente en diferentes ciudades del mundo, mientras que en Argentina adquiere mayor visibilización y aceptación de la sociedad. En este estudio, se analiza el impacto de la implementación de techos verdes en el consumo energético de la climatización de un edificio de la Universidad Nacional de Rafaela. Mediante el programa de simulación *EnergyPlus*, se compara el consumo de energía de dos escenarios: uno con techo verde y otro sin él. Los resultados se evalúan para los meses de mayor y menor temperatura externa, y para el ciclo anual completo, proporcionando una perspectiva detallada sobre la efectividad de los techos verdes en la región. Se establece la necesidad de medir el consumo de energía de los equipos de climatización, así como las temperaturas y humedades internas a diferentes alturas y en zonas térmicas de interés.

Palabras clave: techo verde, simulación, EnergyPlus, eficiencia energética, campus universitario, edificio, terraza verde.

INTRODUCCIÓN

El sector Edificios es uno de los principales responsables de la generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI), contribuyendo aproximadamente con el 30% a nivel global. Según el IPCC (2022), los GEI son una de las principales causas del cambio climático. Los efectos adversos de este fenómeno, como el aumento de la temperatura y olas de calor cada vez más frecuentes, generan desafíos en la búsqueda de construcciones que permitan un ahorro energético, (Hassid, 2011), así como la implementación de diversas estrategias pasivas o de bajo consumo energético para la refrigeración y calefacción en el interior de los edificios (Breesch y Janssens, 2010; Yi et al., 2014; Zhou, 2014; Santamouris, 2016).

Dentro de las alternativas, la construcción de techos verdes se ha convertido en una opción concreta en determinados lugares (Berardi, 2016), y su implementación continúa en aumento, debido a los diversos beneficios que ofrece, tanto a nivel particular como comunitario (Castleton et al., 2010). Ciudades de Alemania y Países Bajos en Europa; así como de Canadá, Estados Unidos y Brasil en América, promueven este tipo de construcciones a través de marcos legislativos, ya sea mediante incentivos, obligaciones impositivas o subsidios a la construcción (Liberalesso et al., 2020). Si bien la incorporación de techos verdes se realiza principalmente en nuevas construcciones, en la actualidad también se están implementando en edificios ya existentes, mejorando el confort térmico, generando ahorros energéticos, y aportando una mejora en el aspecto estético, tanto del edificio como del entorno urbano (Gagliano et

al., 2016; Gagliano et al., 2014). En Argentina, el empleo de techos verdes se encuentra en una fase incipiente, con pocos proyectos llevados a cabo, pero con un creciente interés por parte de diferentes actores (Arregui, 2016). En esta dirección, entre los primeros antecedentes, la ciudad de Rosario creó un programa de techos verdes mediante una ordenanza, y más tarde, en 2016 la ciudad de Córdoba promulgó la ordenanza N° 12548 que obliga la inclusión de techos verdes en superficies mayores a los 400 m².

Investigaciones realizadas a nivel global han demostrado los diversos beneficios que aporta la implementación de techos verdes en el tejido urbano. Estos incluyen mejoras en el confort térmico, ahorro energético, retención y mitigación del escurrimiento hídrico, reducción del efecto de “isla de calor”, y una mayor valoración estética, entre otras ventajas (Berardi et al., 2014; Saadatian et al., 2013; Czemieli, 2010; Giobellina et al., 2016). Además, los techos verdes representan una importante alternativa para abordar la escasez de espacios verdes en las ciudades (Lanham, 2007).

En cuanto a la construcción de techos verdes en instituciones universitarias, no solo mejora en los aspectos antes mencionado, sino que se promueven y replican nuevos paradigmas de sustentabilidad, eficiencia energética y un entorno urbano más amigable con la naturaleza, fomentando así una comunidad más comprometida con el medioambiente (Sangita y Sakharle, 2022; Köhler y Kaiser, 2021). En la región de Santa Fe (Argentina), aunque investigaciones de esta índole recién se están iniciando, forman parte de un trabajo en eficiencia energética que se consolida de manera progresiva (García et al., 2023; Fernández et al., 2023; Cabrera et al., 2023).

Las construcciones de techos verdes, se dividen inicialmente en dos grandes grupos, extensivos e intensivos (Henk, 2016; Berardi et al., 2014). Sin embargo, en la actualidad se puede encontrar un tercer grupo denominado semi-intensivo, que combina características de los dos anteriores, ofreciendo una mayor flexibilidad en su clasificación (Czemieli, 2010; Bevilacqua, 2020). El tipo de techo varía según el tipo de vegetación, la profundidad del sustrato, la accesibilidad y el mantenimiento, entre otras particularidades (Berardi et al., 2014).

Por otra parte, la simulación en el ámbito de la eficiencia energética en edificios es una herramienta muy potente que permite obtener resultados importantes y verosímiles a bajo costo y sin grandes intervenciones en las estructuras. Así, EnergyPlus es un software de simulación versátil, robusto, que desde hace varios años se consolidó como herramienta de preferencia en todo el mundo, y especialmente en esta región (Bre, 2018; Marino et al., 2019; Ávila-Hernández et al., 2020).

El presente artículo tiene como objetivo comparar, mediante simulación, el consumo energético de la climatización en dos espacios de un edificio del Campus universitario de la Universidad Nacional de Rafaela (UNRaf), uno sin techo verde y uno con techo verde, durante los meses de mayor y menor temperatura, así como a lo largo del año. Esta simulación se realiza después de que el techo verde original fuera retirado, una decisión tomada principalmente por razones presupuestarias, pero que no estuvo respaldada por una investigación exhaustiva. Este trabajo dará los primeros pasos en la búsqueda de información que confirme o rectifique dicha decisión.

METODOLOGÍA

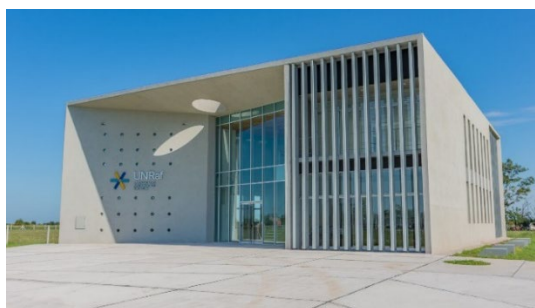
El Campus de la UNRaf se erige sobre un predio de 10 hectáreas y está ubicado en el sector suroeste de la ciudad de Rafaela, provincia de Santa Fe. Este proyecto se inició a partir del año 2017, en conjunto con la Universidad Nacional de San Martín (UNSAM), la cual estuvo encargada de diseñar el Plan Director. El mismo involucra la construcción de 5 edificios principales y 6 módulos más pequeños, de los cuales, actualmente dos de los edificios principales ya se encuentran en funcionamiento, y otros dos edificios (también dentro de los principales) en la fase de construcción. El resto de las edificaciones no están iniciadas. De los edificios en marcha, el primer edificio, conocido como Edificio 1, se inauguró en el año 2021, y el segundo, conocido como Edificio 4, en el año 2023. Ambos cuentan con las instalaciones de plantas fotovoltaicas que generan aproximadamente el 20% del consumo interno de energía eléctrica de cada uno. El Edificio 1 (Figura 1) es objeto de estudio de este trabajo.



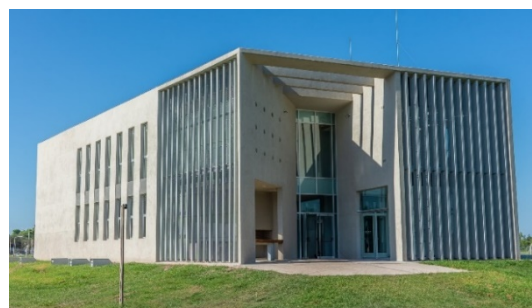
Figura 1: Vista aérea de Edificio 1 Campus UNRaf.

Descripción del edificio

El Edificio 1 es un edificio construido por la empresa Pirámide SA, de la ciudad de Santa Fe. Su diseño se basa en una estructura trapezoidal, organizada en dos plantas y una azotea técnica. Su orientación es N-S, con el acceso principal hacia el sur; cuenta con muros vidriados en ambos frentes que le proporcionan luminosidad durante gran parte del día. Sus espacios están destinados principalmente a laboratorios, aulas, salas de reuniones y salas de trabajo. En su construcción se incorporaron diferentes criterios innovadores. Dentro de ellos se destacan los muros translúcidos de doble vidriado hermético (DVH) como parte de la envolvente, y ventanas y ventanales de DVH, ambas características buscando favorecer la iluminación natural; muros opacos contruidos con ladrillos de hormigón celular curado en autoclave (HCCA); ventilación cruzada generada por una cámara subterránea, con salida en el techo a través de una chimenea; instalación de un termotanque solar para el abastecimiento de agua caliente; estructuras metálicas perforadas, instaladas verticalmente al exterior de los ventanales que tienen como objeto disminuir la posibilidad de deslumbramiento. En las Figuras 1 y 2 se observan varias de estas características. En Figura 2 (a) la normal hacia afuera del acceso apunta en dirección hacia el sur, mientras que en Figura 2 (b) la normal hacia afuera del acceso apunta hacia el norte.



(a)



(b)

Figura 2: Edificio 1 Campus UNRaf, (a) Vista sur-acceso principal, (b) Vista norte-acceso secundario.

En el interior, todos los espacios de trabajo se ubican en las alas este y oeste, distribuidos en las dos plantas, mientras que, en el centro del edificio, se encuentran un hall en planta baja que conecta los dos accesos y un hall de menor tamaño en planta alta (Figura 3).

Las Tabla 1 y Tabla 2 presentan las propiedades físico-térmicas de los diferentes materiales que componen la envolvente del edificio. En Tabla 1 se detallan los elementos de los componentes opacos, en Tabla 2 los elementos translúcidos, y en Tabla 3 las propiedades de las cámaras de aire que componen el cielo raso, según la norma IRAM 11601. A partir de toda esta información la Tabla 4 muestra la conformación de los muros de la envolvente.

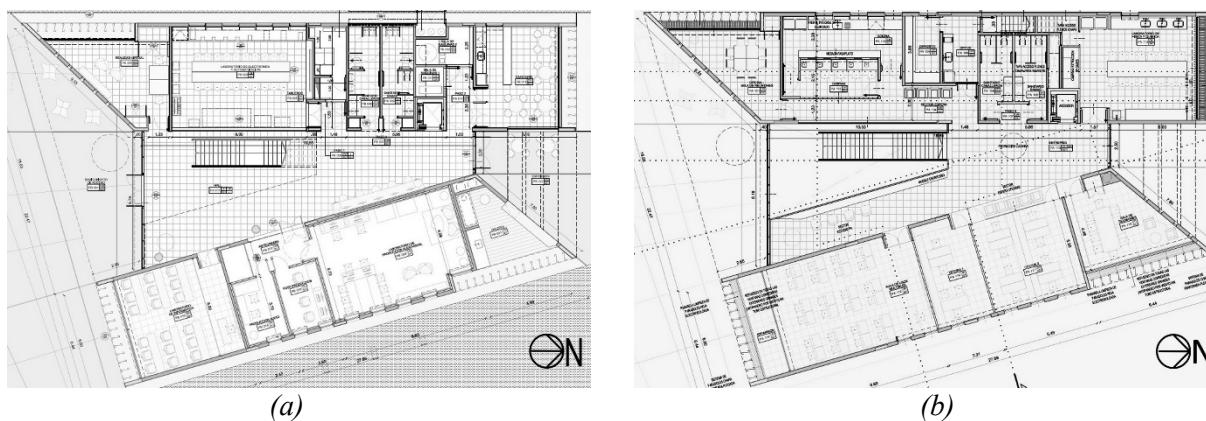


Figura 3: Edificio 1 Campus UNRaf, (a) vista planta baja, (b) vista planta alta.

Tabla 1: Propiedades físico-térmicas de materiales de la envolvente. Opacos

	Carpeta	Hormigón Armado	Hormigón RDC300	Poliestireno expandido	Madera roble	Ladrillo HCCA	Membrana asfáltica
Espesor (cm)	3	8/10/20	8/11	12	2,54	12,5/15/20	7
Conductividad (W/m·K)	1,3	0,97	0,89	0,037	0,24	0,12	0,7
Densidad (Kg/m³)	2100	1800	1900	15	650	680	2000
Calor específico (J/KG·C)	836,8	836,8	836,8	1200	2400	1000	1300
	Mosaico granítico	Placa fonoabsorbente	Placa yeso	Revoque exterior	Revoque interior	Aluminio	Lana vidrio
Espesor (cm)	1,8	3	1,25	2,5	2,5	0,25	7
Conductividad (W/m·K)	4,1	0,027	0,51	1,16	0,93	204	0,045
Densidad (Kg/m³)	2900	32	1200	1900	1900	2700	10
Calor específico (J/KG·C)	837	1400	837	837	837	900	840

Tabla 2: Propiedades físico-térmicas de materiales de la envolvente. Translúcidos

	Vidrio	Polycarbonato
Espesor (mm)	3/4/6	10
Conductividad (W/m·K)	1,05	0,23
Transmitancia solar a 90°	0,85	0,837
Reflectancia solar frontal a 90°	0,08	0,075
Reflectancia solar dorsal a 90°	0,08	0,01
Transmitancia visible a 90°	0,906	0,898
Reflectancia visible frontal a 90°	0,08	0,081
Reflectancia visible dorsal a 90°	0,08	0,01

Tabla 3: Propiedades físico-térmicas del aire estacionario en cielo raso

	Aire	
Espesor (cm)	>10	
Dirección flujo de calor	Ascendente	Descendente
Resistencia térmica (m²·K/W)	0,14	0,21

Los espacios seleccionados para este trabajo se muestran en Figura 4. Sobre el ala este, el espacio de trabajo elegido se conoce como *CIT* (Centro de Investigación y Transferencia Rafaela), ubicado en el centro. Sobre el ala oeste, en la esquina norte, el espacio es un laboratorio denominado *Alimentos*. Al momento de su elección, se tuvo en cuenta que sean espacios afectados de manera directa por el techo expuesto al exterior y, el cual se ensaya con y sin techo verde. Además, se priorizó que pertenezcan a diferentes alas y tengan una actividad constante durante todo el año. El espacio *CIT* tiene una dimensión de 8,80 m de largo y 5,30 m de ancho. Su piel interna está conformada por (Tabla 5): (i) *Pared interior 1* al sur; (ii) *Pared interior 2* junto con *Muro vidriado* y *2 Puerta vidrio* al oeste; (iii) *Pared interior 3* al norte; y (iv) *Piso 2*. El espacio *Alimentos* tiene un tamaño de 6,60 m de largo por 6,00 m de ancho.

Su piel interna está compuesta por: (i) *Pared interior 2* al sur; (ii) al este por *Pared interior 4* y *Puerta vidrio*; y (iii) *Piso 1*.

Tabla 4: Muros de la envolvente

Pared exterior 1	Pared exterior 2	Techo 1	Techo 2	Piso	DVH	Ventanas DVH 1	Ventanas DVH 2	Lucarna
Revoque exterior	Revoque exterior	Membrana asfáltica	Membrana asfáltica	Poliestireno expandido	Vidrio (6 mm)	Vidrio (4 mm)	Vidrio (3 mm)	Policarbonato
Ladrillo HCCA (20 cm)	Ladrillo HCCA (20 cm)	Hormigón RDC300 (8 cm)	Hormigón RDC300 (8 cm)	Hormigón armado (8 cm)	Vacío (12 mm)	Vacío (6 mm)	Vacío (6 mm)	
Revoque interior	Revoque interior	Hormigón armado (20 cm)	Hormigón armado (20 cm)	Hormigón RDC300 (11 cm)	Vidrio (6 mm)	Vidrio (4 mm)	Vidrio (3 mm)	
	Lana vidrio	Aire	Aire	Carpeta				
	Placa yeso	Placa yeso	Madera roble	Mosaico granítico				
	Placa fonoabsorbente							

Tabla 5: Piel interna de los espacios CIT y Alimentos

Pared interior 1	Pared interior 2	Pared interior 3	Pared interior 4	Muro vidriado	Puerta vidrio	Piso 1	Piso 2
Placa yeso	Revoque interior	Revoque interior	Revoque interior	Vidrio (6 mm)	Vidrio (6 mm)	Placa yeso	Placa fonoabsorbente
Lana vidrio	Ladrillo HCCA (20 cm)	Ladrillo HCCA (15 cm)	Ladrillo HCCA (12,5 cm)	Vidrio (6 mm)	Vidrio (6 mm)	Aire	Placa yeso
Placa yeso	Revoque interior	Revoque interior	Revoque interior			Hormigón armado (20 cm)	Aire
						Hormigón RDC300 (8 cm)	Hormigón armado (20 cm)
						Carpeta	Hormigón RDC300 (8 cm)
						Mosaico granítico	Carpeta
							Mosaico granítico

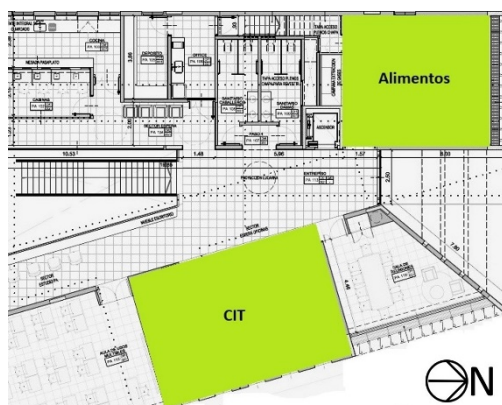


Figura 4: Espacios seleccionados para la investigación.

Modelado de energía del techo verde

El techo verde se divide en tres grandes grupos: (i) extensivo, (ii) semi-intensivo e (iii) intensivo. La diferencia entre ellos radica en su carga, profundidad de sustrato, tipos de plantas, accesibilidad y mantenimiento. Mientras que en el extensivo prácticamente se dificulta su acceso, por lo que no requiere mantenimiento, en el intensivo ocurre lo contrario. El tamaño de planta y la profundidad de sustrato también varía de menor altura en un techo extensivo a mayor altura en un intensivo. En el caso del semi-intensivo, es una categoría que puede tener características de las otras dos. Para el modelado se consideró un techo semi-intensivo con las características que se presentan más adelante. En Tabla 6 se detallan las características de los techos extensivos e intensivos.

Tabla 6: Tipos de techos verdes. Principales características

Atributos	Extensivo	Intensivo
Espesor de sustrato	Hasta 25 cm	Por encima de 25 cm
Accesibilidad	Inaccesible	Accesible (mantenimiento y otros)
Peso	70-140 kg/m ²	Por encima de 200 kg/m ²
Altura de plantas (tipos)	Bajas (mayormente césped)	Altas (plantas, arbustos y árboles)
Irrigación	No es necesaria	Es necesaria
Mantenimiento	No requiere atención	Requiere atención

El mecanismo de intercambio de energía de un techo verde se produce por los modos convectivo, conductivo y por evapotranspiración (Berardi et al., 2014; Gagliano et al., 2016). Para modelar el balance de energía, el techo verde se debe subdividir en tres capas (Sailor, 2008): (i) la capa estructural o de soporte, (ii) la capa de sustrato o suelo, y (iii) la cubierta. Según Gagliano et al., 2014, el sustrato es un compuesto complejo que cuenta con una fase sólida (materiales orgánicos y minerales), una fase líquida (agua) y una fase gaseosa (aire y vapor de agua). La cubierta se compone por la vegetación y el aire que se encuentra entre ella. La ecuación que modela el balance térmico se conoce como FASST (Fast All-Season Soil STrength) (Engineering Reference – EnergyPlus, 2023), e involucra la temperatura de la superficie del suelo (T_g) y la temperatura del follaje (T_f) (Figura 5). De esta forma, las ecuaciones (1) y (2) determinan los balances térmicos del follaje y de la superficie del suelo, respectivamente. Así, se tiene:

$$F_g = (1 - \sigma_f)[I_s^\downarrow(1 - \alpha_g) + \varepsilon_g I_{ir}^\downarrow - \varepsilon_g T_g^4] - \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + K \frac{\partial T_g}{\partial z} \quad (1)$$

$$F_f = \sigma_f [I_s^\downarrow(1 - \alpha_f) + \varepsilon_f I_{ir}^\downarrow - \varepsilon_f \sigma T_f^4] - \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f \quad (2)$$

donde:

F_g = flujo de calor del suelo (W/m ²)	K = conductividad térmica total (W/m·K)
F_f = flujo de calor del follaje (W/m ²)	σ = constante de Stefan-Boltzmann
H_g = flujo de calor sensible del suelo (W/m ²)	σ_f = fracción de cubierta de la vegetación
H_f = flujo de calor sensible del follaje (W/m ²)	ε_g = emisividad de la superficie del suelo
I_s^\downarrow = radiación de onda corta total recibida (W/m ²)	ε_f = emisividad de la superficie del follaje
I_{ir}^\downarrow = radiación de onda larga total recibida (W/m ²)	$\varepsilon_1 = \varepsilon_g + \varepsilon_f - \varepsilon_g \varepsilon_f$
L_g = flujo de calor latente del suelo (W/m ²)	α_g = albedo del suelo
L_f = flujo de calor latente del follaje (W/m ²)	α_f = albedo del follaje

Según Gagliano et al., 2016, el flujo de calor radiante incluye la radiación solar absorbida por las hojas, y la radiación de onda larga intercambiada por las hojas y el cielo, por las hojas y la superficie del suelo y entre las hojas mismas. Asimismo, las plantas cumplen la función de atenuación del sobrecalentamiento que se produce en el verano, las cuales absorben el 60% de radiación incidente y reflejan el 22% aproximadamente, limitando a un 18% la absorción de radiación solar hacia el interior.

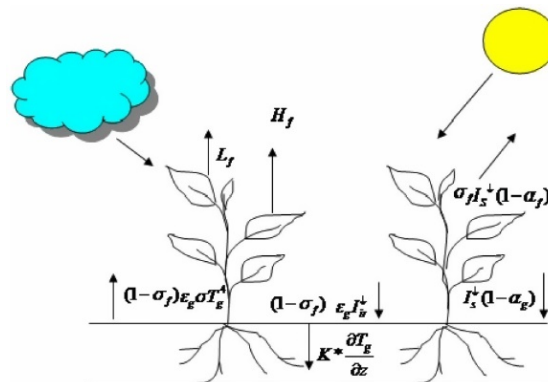


Figura 5: Balance de energía de un techo verde.

Modelado y Simulación

El modelado del edificio (diseño, materiales y las zonas térmicas) se realizó en el programa OpenStudio. En Figura 6 se puede ver el modelo 3D. Los detalles restantes, como el modelado del piso y el techo verde se definieron directamente en el programa de simulación. Internamente, en la mayoría de los espacios se respetaron sus conformaciones, con algunas excepciones: cocina, baños y depósito en planta alta conformó una zona térmica; baños, depósito y servidores otra zona térmica. Por otra parte, CIT posee una división interna que divide en dos el espacio.

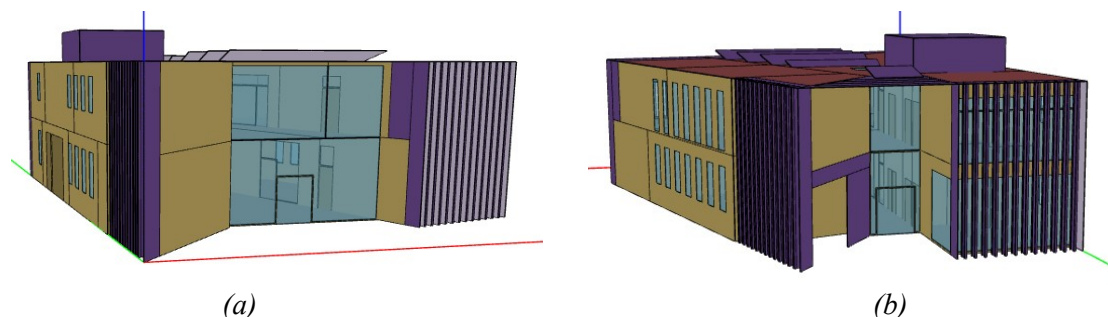


Figura 6: Render de modelado edificio, (a) vista sur, (b) vista norte.

En el caso del techo verde original del edificio no se dispone de la composición por capa ni todas sus propiedades. Por lo tanto, en el modelado se ha recurrido en parte a la información del techo verde retirado y en parte a datos de otras investigaciones (Gagliano et al., 2014; Gagliano et al., 2016). De esta forma, en Tabla 7 se detallan las diferentes capas y sus propiedades. Para la vegetación se consideró gramilla (Figura 1), con una altura de 10 cm, abundante, con un índice de superficie de hoja (LAI, por sus siglas en inglés) $LAI = 4$.

Tabla 7: Composición por capa del techo verde. Propiedades térmicas

Capa	Profundidad (cm)	Conductividad (W/m·K)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg·K)
Vegetación	10	0,98	1460	900
Filtrado agua	0,1	0,22	910	1800
Drenaje	10	0,93	1800	1000
Antirraíz	0,5	0,19	1400	1200
Membrana impermeable	0,5	0,033	100	710

Respecto a la simulación, la misma se realizó con EnergyPlus, versión 23.2.0. El clima anual utilizado se obtuvo a través de un año típico para la región de Rafaela, entre los años 2007 – 2021 (Figura 7). De aquí se dedujo que el mes más caluroso es enero (temperatura promedio $\bar{T}_{\text{enero}} = 26,24^{\circ}\text{C}$), con $T_{\text{min}} = 14,00^{\circ}\text{C}$ y $T_{\text{max}} = 37,40^{\circ}\text{C}$; y el mes de julio como el mes más frío ($\bar{T}_{\text{julio}} = 12,38^{\circ}\text{C}$), con $T_{\text{min}} = -0,60^{\circ}\text{C}$ y $T_{\text{max}} = 30,20^{\circ}\text{C}$. El edificio se consideró con su carga térmica típica del año 2023. Para el CIT, se consideraron 20 personas en total con actividades de oficina, desde las 8:00 hasta las 20 horas, con fluctuaciones según la hora. La carga de iluminación relevada resultó en 600 W, considerándose prácticamente activas durante las 12 horas. El equipamiento eléctrico comprende un promedio de 7 puestos de trabajos activos (PC con monitor) y otros (cafetera, pava eléctrica, cargadores de notebook y celular, etc.), promediando una energía de consumo horaria de 1500 Wh. Para Alimentos se consideró activo a partir de las 16 hasta las 22 horas, con días intermitentes activos en la mañana. Se asumió una capacidad de 5 usuarios, con algunas variaciones según el día de la semana. La iluminación representa una carga de 700 W, activa el 100% en sincronía con los usuarios. La carga máxima de este espacio es de 4000 W debido a la existencia de una heladera y un horno eléctrico, entre otros equipos. No obstante, el consumo promedio es de 400 Wh, ya que, en el caso del horno, tiene un uso insignificante al día de hoy.

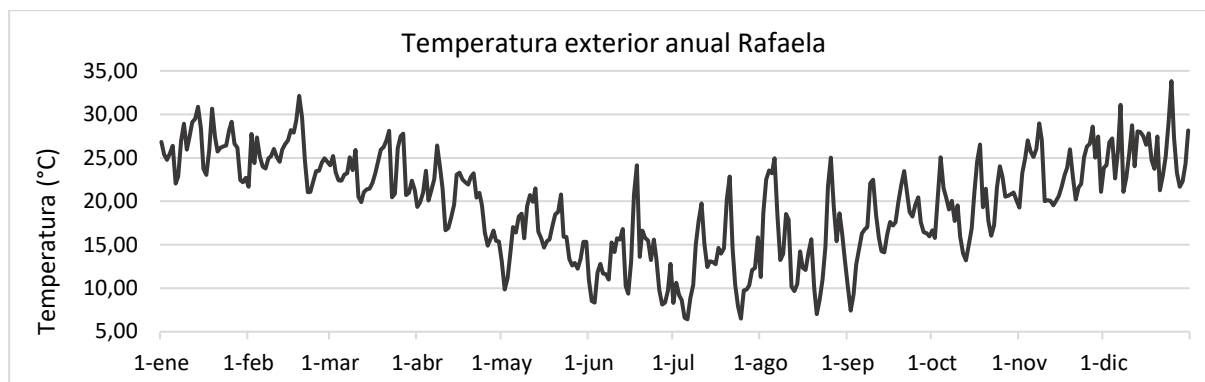


Figura 7: Temperatura anual típica (año 2007 – 2021). Zona Rafaela.

En la climatización se consideraron equipos individuales para cada espacio, con sistemas de refrigeración y de calefacción eléctricos. El tamaño de los mismos se obtuvieron mediante el mismo programa de simulación, a través del método de *SizingPeriod:DesignDay*, el cual dimensiona los equipos teniendo en cuenta el volumen, las cargas térmicas y dos días típicos, de calor y de frío, de la zona. Las temperaturas de termostatos elegidas para refrigeración y para calefacción fueron de 24°C y 21°C respectivamente. Las temperaturas de los ambientes se controlaron durante todo el año, de lunes a viernes, de 8 a 23 horas, y los sábados de 8 a 13 horas.

Finalmente, terminados los modelos con y sin techo verde, se seleccionó como salida la variable de consumo de energía de cada equipo HVAC (Heating Ventilation and Air Conditioning, por sus siglas en inglés).

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Las simulaciones llevadas a cabo fueron en los meses de temperaturas más extremas de la región de Rafaela, es decir, el mes de enero (mes más caluroso), y el mes de julio (mes más frío), y una simulación anual. En Figuras 8, 9 y 10 se observan los resultados obtenidos en *CIT*, mientras que en Figuras 11, 12 y 13 se muestran los resultados en *Alimentos*.

Los gráficos muestran un ahorro de energía durante gran parte del tiempo, cuando el edificio cuenta con techo verde. No obstante, se observan importantes diferencias entre los espacios analizados (*CIT* y *Alimentos*) y en el período anual. En el mes estival *CIT* llega a un ahorro del 30%, siendo que en *Alimentos* apenas llega al 10%. En julio, el ahorro mayor sucede en *Alimentos* (cerca de un 40% menos de consumo), mientras que en *CIT* es de 10%. Estos valores se relacionan con la ubicación de cada espacio, y con la exposición a la radiación solar. *Alimentos* cuenta con ventanales hacia el norte que permite mayor ingreso de radiación solar, al mismo tiempo que posee tres de sus paredes expuestas al exterior. Estas características hacen que en verano no haya una diferencia significativa en el uso de techo verde. Algo opuesto sucede en invierno, sobre todo en el mes más frío, la aislación térmica del techo verde permite mantener el calor ganado por la radiación solar que ingresa por los ventanales. En el espacio *CIT*, el ahorro de energía es mayor durante los meses de calor, disminuyendo en los meses de bajas temperaturas. En otras palabras, la incorporación del techo verde tiene un efecto más contundente, especialmente en verano. De esta forma, la instalación de un techo verde sobre el Edificio 1 permite un ahorro de energía por encima del 25% en *CIT*, y un ahorro de 15% en *Alimentos*.

Cabe destacar que el techo verde, al ser semi-intensivo requiere de un mantenimiento mínimo, que de no hacerlo puede llevar incluso a que el mismo pase a ser una carga térmica más para el edificio.

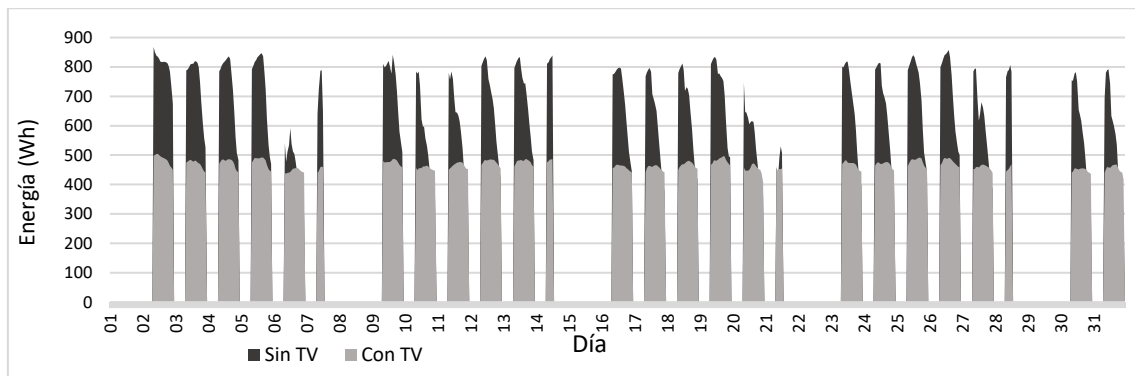


Figura 8: Consumo de energía en CIT. Enero.

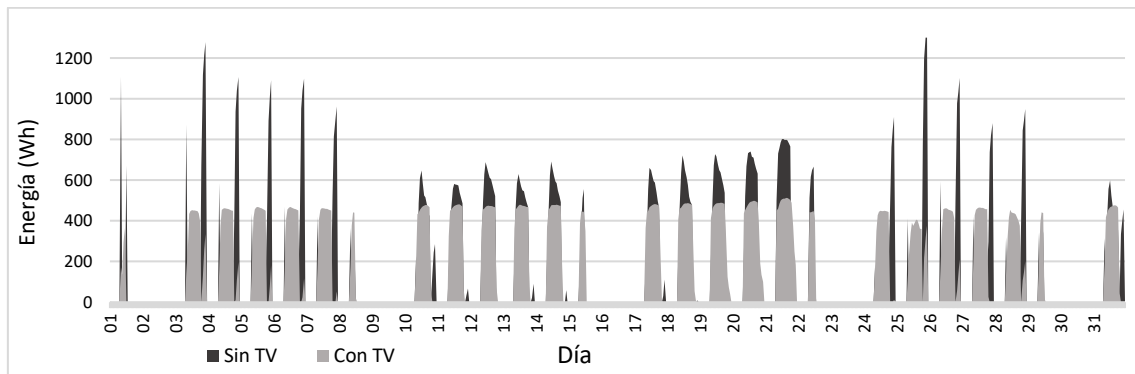


Figura 9: Consumo de energía en CIT. Julio.

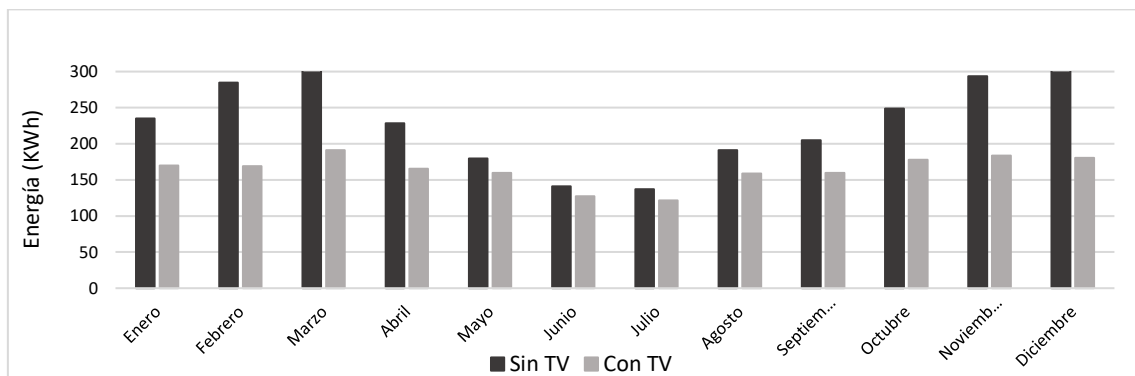


Figura 10: Consumo de energía en CIT. Anual.

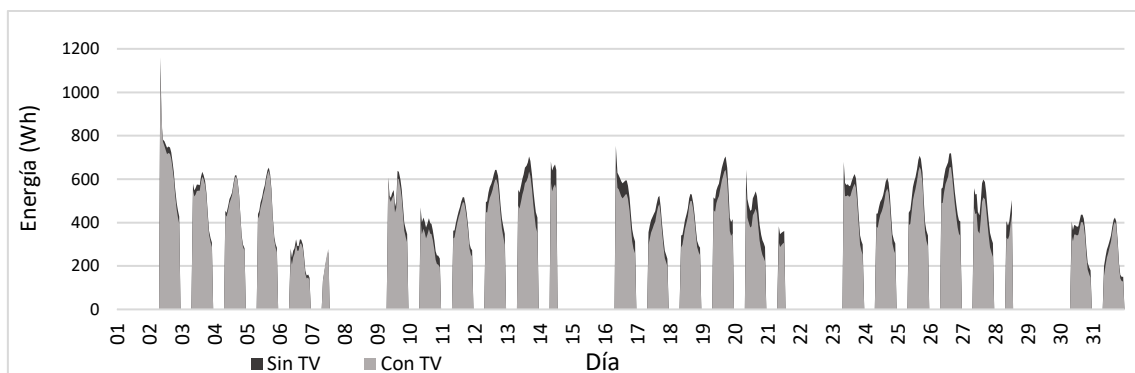


Figura 11: Consumo de energía en Alimentos. Enero.

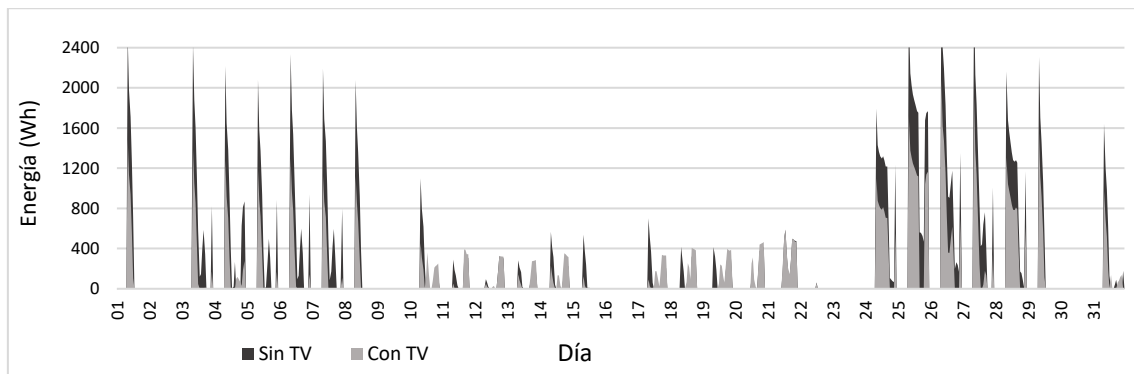


Figura 12: Consumo de energía en Alimentos. Julio.

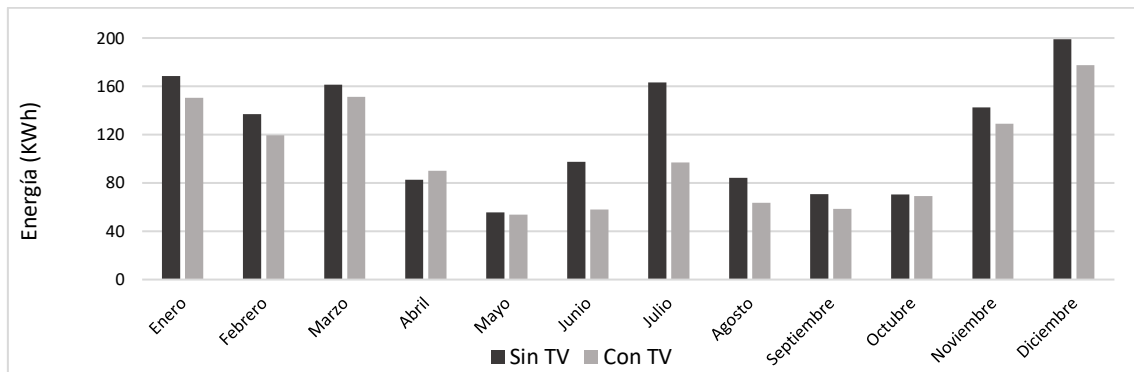


Figura 13: Consumo de energía en Alimentos. Anual.

CONCLUSIONES

En el Edificio 1 del Campus de la UNRaf se analizó y comparó el consumo energético de dos espacios de trabajo, uno sin techo verde y otro con techo verde. El análisis se realizó para periodos de tiempo de temperaturas extremas de frío y calor, y para el periodo de un año. El modelado se llevó a cabo en *OpenStudio* y las simulaciones se realizaron utilizando el programa *EnergyPlus*. Los resultados mostraron que: (i) en los meses de enero y de julio se produjo un ahorro energético que varía desde un 10% hasta el 30% (hasta un 40% en julio), dependiendo de la ubicación del espacio y sus características constructivas; (ii) a lo largo del año se observó un ahorro de energía significativo en los dos espacios, con variaciones relacionadas con lo mencionado en (i); (iii) el consumo de energía del HVAC en *CIT* teniendo en cuenta el techo verde, es más estable y con menor variación entre los diferentes meses del año, debido al aumento de inercia térmica que este provoca en dicho espacio, si se compara sin el techo verde; no sucede lo mismo en *Alimentos* ya que, se puede observar la influencia que tiene la radiación solar entrante en este espacio.

Estas características que diferencian la forma de consumo de un espacio respecto del otro, destacan la importancia del control de la radiación solar tanto en los meses de calor como en los de frío, ya sea para evitar o aprovechar su efecto térmico. De este modo, la gestión del calor adicional (o su faltante) puede influir en el consumo eléctrico.

A partir de estos resultados, se establece la necesidad de medir el consumo de energía de los equipos HVAC, así como las temperaturas internas y humedades internas a diferentes alturas y en zonas térmicas de interés. Esto permitirá validar el resultado de las simulaciones y evaluar el costo de instalación y mantenimiento del techo verde. Así como, calcular el tiempo de amortización del mismo para compararlo con las actuales tarifas de energía que rigen en el país.

REFERENCIAS

Ávila-Hernández, A., Simá, E., Xamán, J., Hernández-Pérez, I., Téllez-Velázquez, E., & Chagolla-Aranda, M. A. (2020). Test box experiment and simulations of a green-roof: Thermal and energy performance of a residential building standard for Mexico. *Energy and Buildings*, 209, 109709.

- Arregui Henk, L. J. 2016. El futuro de los techos verdes en la ciudad de Buenos Aires [en línea]. Trabajo Final de Ingeniería en Producción Agropecuaria. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Católica Argentina. Disponible en: <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/tesis/futuro-techos-verdes-buenos-aires.pdf> [Fecha de consulta:8/7/2024].
- Breesch H., Janssens A. (2010). Performance evaluation of passive cooling in office buildings based on uncertainty and sensitivity analysis. *Solar Energy*. 84, 1453 -1467.
- Bevilacqua P., Bruno R., Arcuri N. (2020). Green roofs in a Mediterranean climate: Energy performances based on in-situ experimental data. *Renewable Energy*. 152, 1414-1430.
- Berardi U., GhaffarianHoseini A., GhaffarianHoseini A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*. 115, 411-428.
- Berardi U. (2016). The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits. *Energy and Buildings*. 121, 217-229.
- Bre, F. (2018). Optimización del desempeño térmico y energético de viviendas en la región Litoral Argentina.
- Cabrera D., Silva L. I., Medina J. C., García M. S. (2023). Construcción de indicadores de desempeño energético para estimar el consumo de energía en un nuevo Campus universitario. *Actas de la XX reunión de trabajo en procesamiento de la información y control – RPIC2023*. 20, 710-715
- Castleton H.F., Stovin V., Beck S. B. M. Davison J.B. (2010). Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*. 42, 1582-1591.
- Czemiel B. J. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*. 36, 351-360.
- Fernández F. J., García M. S., Silva L. I. (2023). Desarrollo de un modelo computacional utilizado para evaluar la Eficiencia Energética de edificios, a través del análisis del comportamiento térmico de sus estructuras constructivas. *Actas de la XX Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control – RPIC 2023*. 20, 151-156.
- Gagliano A., Detommaso M., Nocera F., Patania F., Aneli. (2014). The Retrofit of Existing Buildings Through the Exploitation of the Green Roofs - A Simulation Study. *Energy Procedia*. 62, 52-61.
- Gagliano A., Detommaso M., Nocera F., Berardi U. (2016). The adoption of green roofs for the retrofitting of existing buildings in the Mediterranean climate. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*. 7, 116-129.
- García M. S., Silva L. I., Cabrera D., Fernández F. J. (2023). Modelado y Simulación de la Dinámica Térmica de un Edificio Educativo de Argentina. *Actas de la XX Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control – RPIC 2023*. 20, 724-729.
- Giobellina B., Maristany A., Angiolini S., Medina S., Pomazán S., Celiz Y., Márquez F. (2016). Rendimiento térmico de cubiertas verdes sobre techo de chapa en la Ciudad de Córdoba – Argentina. *Actas del I Encuentro Nacional sobre Ciudad, Arquitectura y Construcción Sustentable*. 1, 243-253.
- Hassid S. (2011). Developments in the residential energy sector in Israel. *Advances in Building Energy Research*. 5, 71-9.
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press. Disponible en: www.ipcc.ch/report.
- Köhler M., Kaiser D. (2021). Green Roof Enhancement on Buildings of the University of Applied Sciences in Neubrandenburg (Germany) in Times of Climate Change. *Atmosphere*. 12, 382.
- Lanham J.K. (2007). Thermal performance of green roofs in cold climates. 46.
- Liberalesso T., Olivera C. C., Matos S. S., Manso M. (2020). Green infrastructure and public policies: An international review of green roofs and green walls incentives. *Land Use Policy*. 96, 104693.
- Marino, B. M., Muñoz, N., & Thomas, L. P. (2019). Análisis del comportamiento térmico de un edificio complejo del centro bonaerense a partir de simulaciones con energyplus. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 44, 29-38.
- Saadatian O., Sopian K., Salleh E., Lim C.H., Riffat S., Saadatian E., Toudeshki A., Sulaiman M.Y. (2013). A review of energy aspects of green roofs. 23,155-168.
- Sailor D. J., (2008). A green roof model for building energy simulation programs. *Energy Build* 2008. 40, 1466 – 1478.
- Sangita M. S., Sakharle D. (2022). Design of green roof for an energy efficient university campus. *Maretials Today: proceedings*. 65, 1546 – 1550.
- Santamouris, M. (2016). Cooling of buildings. Past, present and future. *Energy Build*. 128, 617-638.

- U. S. Department of Energy, (2013). Engineering Reference, Advance Surface Concepts, Green Roof Model (EcoRoof). 187-196.
- Yi X., Tang L., Yeboah S. (2024). Investigations into impacts of fenestration and shading variation on ventilation and energy performance of an office in cooling and heating seasons. *Solar Energy*. 276, 112646.
- Zhou Y., Clarke L., Eom J., Kyle P., Patel P., Kim S.H., Dirks J., Jensen E., Liu Y., Rice J., Schmidt L., Seiple T. (2014). Modeling the effect of climate change on US state-level buildings energy demands in an integrated assessment framework. *Applied Energy* 113, 1077-1088.

COMPARISON OF ENERGY CONSUMPTION FOR HVAC IN AN UNIVERSITY BUILDING WITH AND WITHOUT GREEN ROOF– SIMULATION STUDY

ABSTRACT: Energy saving in buildings has become a key challenge to reduce greenhouse gas emissions, thereby contributing to climate change mitigation. Last decade, green roofs have been consolidated in different cities of the world, while in Argentina, it is gaining greater visibility and acceptance. This article analyzes the impact of green roof installation on energy consumption for heating and cooling in a building at the National University of Rafaela. Using the *EnergyPlus* simulation software, energy consumption is compared between two scenarios: one that includes a green roof and another without. The analysis is conducted for the months with extreme high and low external temperatures, as well as for the entire year, offering a comprehensive perspective on the effectiveness of green roofs in the region.

Keywords: green roof, simulation, EnergyPlus, energy efficiency, university campus, building.