

DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE LA LANA OVINA APLICADA COMO AISLANTE TÉRMICO EN PROGRAMA DE VIVIENDA RURAL PARA LA ZONA CÁLIDA DE URUGUAY

Cecilia M. Gonzalvez^{1,2}, Marcos Hongn³, Gerardo Vitale^{2,4}

¹Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo, Universidad de la República (FADU, Udelar)

²Laboratorio de Energía Solar, Universidad de la República (LES, Udelar)

³Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional, Universidad Nacional de Salta (INENCO, UNSa-CONICET)

⁴Departamento de Física, Centro Universitario Regional Litoral Norte, Universidad de la República (CENUR LN, Udelar)
e-mail: arquitesista@gmail.com

Recibido 29/7/2025; Aceptado 06/10/2025

RESUMEN.- Por su conjunto de características y propiedades físicas, la lana ovina es un material con óptimas condiciones para ser utilizado como aislante térmico, es un excelente aislante acústico, tiene un bajo índice de toxicidad y es un material ignífugo. El objetivo de esta investigación es obtener un material apto para ser utilizado en obras edilicias, conocer sus propiedades térmicas y evaluar su desempeño. Para ello, se describen los resultados del proceso de acondicionamiento del material que permiten viabilizar su puesta en obra; se estudia su conductividad térmica a través de ensayos de muestras de distintas densidades; y finalmente se evalúa el desempeño energético de una vivienda aislada con lana ovina a través de la simulación de un modelo numérico. El material analizado arroja resultados que aseguran un comportamiento térmico adecuado de la lana en su función aislante. La masa térmica aislada es ampliamente beneficiosa como estrategia de diseño pasivo para los requerimientos del período frío, donde las horas de desconfort pueden ser reducidas entre un 30 y 55% respecto al caso base. Sin embargo, puede suponer un efecto de sobrecalentamiento de los locales durante el período caluroso, esto implica que es necesario optimizar el diseño edilicio para mejorar los requerimientos de confort en los espacios habitables.

Palabras clave: lana de oveja, conductividad térmica, eficiencia energética

ENERGY PERFORMANCE OF SHEEP WOOL USED AS THERMAL INSULATION MATERIAL IN A RURAL HOUSING PROGRAM FOR THE WARM ZONE OF URUGUAY

ABSTRACT.- Due to its set of characteristics and physical properties, sheep wool has optimal conditions for use as thermal insulation, it's an excellent acoustic insulator, has a low toxicity index, and is fire-resistant. The aim of this research is to develop a material suitable for use in building construction, to understand its thermal properties, and to evaluate its performance. To this end, the results of the material conditioning process are described, which enable its practical application; its thermal conductivity is studied through tests on samples of varying densities; and finally, the energy performance of a dwelling insulated with sheep wool is studied through the simulation of a numerical model. The tests carried out confirm the adequate thermal behavior of wool as an insulation material. It can be concluded that insulated thermal mass is highly beneficial as a passive design strategy for cold-season requirements, with reduction in the percentage of discomfort hours between 30% and 55% compared to the base case. However, it may lead to overheating of indoor spaces during the warm season, implying the need to optimize architectural design to improve comfort requirements in living spaces.

Keywords: sheep wool, thermal conductivity, energy efficiency

1. INTRODUCCIÓN

En las prácticas de construcción convencionales, la mayoría de

los materiales utilizados tienen poca o ninguna consideración por el impacto ambiental. Su extracción, transporte y procesamiento suelen requerir un consumo energético considerable. Además,



Esta obra está bajo Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

para mejorar su rendimiento técnico, estos materiales suelen contener aditivos químicos que pueden suponer riesgos para la salud humana. Hoy en día, la búsqueda de una construcción sustentable ha dejado de ser una preferencia personal para convertirse en una necesidad regulada, y se están implementando medidas para mejorar el rendimiento ambiental de los edificios y las infraestructuras, Pinto et al., (2012). La arquitectura sustentable aborda este problema considerando el uso de recursos, la huella ecológica y los posibles riesgos para la salud.

La demanda de materiales sustentables de aislamiento para edificios ha aumentado debido a la preocupación mundial por la sustentabilidad y la mitigación del cambio climático. En particular, los materiales renovables han adquirido gran importancia, Aditya et al. (2017). Liuzzi et al. (2016) estudiaron las propiedades térmicas de una mezcla compuesta por diferentes porcentajes de arcilla, arena, paja y cemento para producir tableros y ladrillos. Los resultados mostraron que aumentar la cantidad de paja garantizaba un mejor rendimiento térmico. Giroudon et al. (2019) investigaron los efectos de la paja de cebada y lavanda en ladrillos de tierra cruda variando la concentración de fibras (es decir, 3% y 6% en masa). Los autores encontraron que, al aumentar el porcentaje de fibras, la conductividad térmica disminuye; los valores más bajos medidos fueron de $0,28\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ para muestras con un 6% de paja de lavanda y de $0,15\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ para muestras con un 6% de paja de cebada. Asdrubali et al. (2015) recopilieron información sobre el bagazo/caña de azúcar utilizado para paneles aislantes térmicos y acústicos. Antunes et al. (2019) evaluaron paneles compuestos de cascarilla de arroz, tierra, yeso y cal aérea; en este caso, los mayores porcentajes de fibra también mejoraron las propiedades aislantes. Otros autores evaluaron el rendimiento térmico de materiales aislantes compuestos por fibras de paja de trigo y cáscara de maíz (Rojas et al., 2019).

En este contexto, la valorización de desechos ganaderos, como la lana de oveja, como componente de elementos de construcción, está captando la atención de investigadores, técnicos y actores económicos. Este material natural se ha utilizado tradicionalmente para la producción de textiles. La tecnología de aislamiento con lana de oveja es bastante avanzada en muchos países (Zach et al., 2012 y Korjenic et al., 2015). El mercado de la construcción sustentable ofrece materiales alternativos de aislamiento térmico y acústico, es decir, derivados de la lana de oveja. La lana de oveja es un recurso renovable, reciclable y un material de construcción sustentable con una huella ambiental reducida. El crecimiento sustentable también se basa en la valorización de materiales que pueden ser adquiridos desde el contexto local, como es el caso de la lana esquilada, con el objetivo de reducir la cantidad de residuos, preservando la zona donde se produce, es decir, las zonas rurales y su paisaje.

Algunas investigaciones se han orientado a los aspectos térmicos

de este material natural, comparando la capacidad de aislamiento térmico de la lana de oveja con la de la lana de roca (Reif et al., 2016) y se han obtenido características similares. Gracias a sus propiedades químicas y físicas, la lana de oveja es adecuada para mejorar la calidad del aire interior y regular las condiciones microclimáticas en edificios, Hegyi et al., (2021). Estos estudios, basados en mediciones experimentales, demostraron que la lana de oveja es un excelente material de aislamiento térmico, muy similar a la lana mineral. A pesar de sus características, en varias regiones, como ocurre en el ámbito de producción rural del Uruguay, el tipo de lana que carece de valor textil, no se elimina ni recicla adecuadamente y se considera un residuo sólido. Esta problemática del mercado en relación a los costos de la producción, ha desencadenado un decrecimiento en el sector lanero muy significativo a lo largo del tiempo que aumenta año tras año.

Así, en el presente trabajo se pretende evaluar el desempeño térmico y energético de la lana de oveja utilizada como aislante en obras de construcción. Para ello, se indica un procedimiento de acondicionamiento para la lana de descarte y se lleva a cabo una caracterización del material para su puesta en obra. Finalmente, se evalúa el desempeño del material aplicado como aislante en el programa de vivienda rural MEVIR a través de simulaciones energéticas realizadas a partir de un modelo numérico del caso de estudio.

2. METODOLOGÍA

2.1 Acondicionamiento de la lana

Se realiza un proceso artesanal de acondicionamiento para adecuarla a un uso constructivo y que pueda ser incorporada como aislante térmico en una obra edilicia. Este proceso está conformado por las siguientes etapas: lavado, tratamiento ignífugo y contra insectos, secado y escardado. Se logra así, retirar la mayor parte de la suciedad que presenta una muestra de lana esquilada. La lana proveniente del entorno rural tiene en su composición entre 10% y 12% de lípidos y otro 10% a 12% de restos de tierra, arena y materia vegetal (Pesok, 2004). Este proceso beneficia al producto en lo siguiente: (1) tratamiento contra el ataque de agentes bióticos, algunos insectos se alimentan de queratina y la fibra sucia les resulta más atractiva (Espinoza y Grüzmacher, 2002); (2) eliminación de olores fuertes; (3) mejora sus prestaciones ignífugas; (4) el escardado de la lana contribuye en la limpieza del material y le otorga voluminosidad luego de quedar apelmazado tras el lavado. En la Figura 1, se visualiza la lana en distintas instancias del proceso.

Además de la inspección visual de los resultados de acondicionamiento, se realiza un ensayo de microscopía electrónica de barrido (MEB) en la Facultad de Ciencias (FCIEN, Udelar), con la finalidad de conocer la estructura microscópica del material y

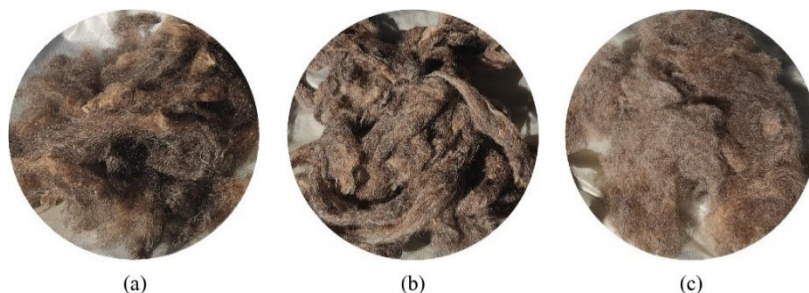


Fig. 1: Lana ovina en distintas instancias del proceso, (a) lana sucia, (b) lana lavada y apelmazada, (c) lana limpia y escardada

analizar su composición química. En estas imágenes es posible observar los resultados de este proceso de acondicionamiento, ya que, como lo demuestra la Figura 2, la lana sucia está completamente recubierta de una capa de material graso con algunas aglutinaciones, mientras que en la lana lavada y escardada se ven claramente las escamas de la cutícula en la superficie de la fibra y el contenido graso ha sido retirado casi por completo. Por lo tanto, el proceso de limpieza puede considerarse satisfactorio.

La ejecución de este proceso de acondicionamiento ha sido documentada a través de un registro visual que se encuentra en un canal de videos en línea de autoría, Arquitesista (2024).

2.2 Ensayo de conductividad térmica

Se cuenta con lana de coloración oscura proveniente de ovejas de raza Corriedale obtenida a partir de la producción rural local. Este material presenta un diámetro de fibra de 29,1 micras ensayado en laboratorio de lanas a través del SUL (Secretariado Uruguayo de la Lana), lo que corresponde a un rango de finura medio. Los ensayos de conductividad térmica se llevan a cabo según la norma UNIT-ISO 8302:1991 (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 2020) a través de un aparato de placa caliente y de placa fría que determina

el coeficiente de conductividad en estado estacionario, el equipo medidor de conductividad térmica utilizado pertenece al Departamento de Arquitectura de CENUR LN, Udelar. Se ensayan muestras de lana limpia, tratada y escardada en aplicación a granel y se trata de cuatro muestras con el mismo espesor: 70mm y distinta densidad aparente: 10kg/m³, 20kg/m³, 30kg/m³ y 40kg/m³ (densidades típicas para aplicaciones constructivas a granel). Para cada muestra se ejecutan tres ensayos correspondientes a tres temperaturas medias de medición: 10°C, 25°C y 40°C, con una diferencia de temperatura entre placas de 15°C.

En la Tabla 1 se presentan los resultados de los ensayos y es notorio cómo en cada muestra el valor de conductividad térmica aumenta al aumentar la temperatura media de medición y ante el aumento de la conductividad térmica, el material disminuye su potencial aislante. Aquí se evidencia el comportamiento dinámico que esta propiedad del material puede presentar en situaciones reales de exposición al ambiente. Aun así, las variaciones entre la medida hallada con una temperatura media de 10°C no son tan distantes al resultado obtenido con 40°C, es decir el material aún demuestra tener una buena capacidad de reducir la transferencia de calor.

Por un lado, la muestra que presenta menor conductividad tér-

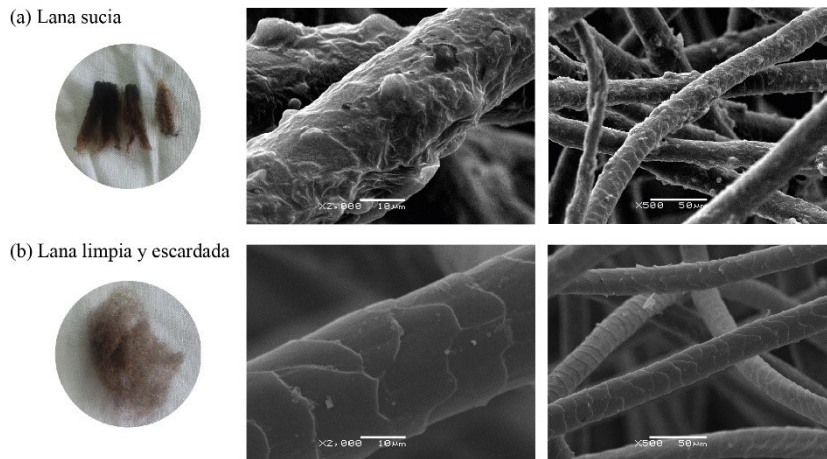


Fig. 2: Ensayos MEB para muestras de lana de ovejas Corriedale

Tabla 1: Resultados de ensayos de conductividad térmica de lana ovina a granel

Ítem	Densidad aparente (kg/m ³)	Espesor nominal (mm)	Temperatura a media de medición (°C)	ΔT entre placas (K)	Conductividad térmica [W/(m·K)]	Transmitancia térmica [W/(m ² ·K)]	Resistencia térmica [(m ² ·K)/W]
LG1_10kg/m ³	10,16	70	10	15	0,05067	0,72	1,38
		70	25	15	0,058	0,83	1,21
		70	40	15	0,06592	0,94	1,06
LG2_20kg/m ³	20,32	70	10	15	0,04022	0,57	1,74
		70	25	15	0,04566	0,65	1,53
		70	40	15	0,05019	0,72	1,39
LG3_30kg/m ³	29,84	70	10	15	0,03624	0,52	1,93
		70	25	15	0,04099	0,59	1,71
		70	40	15	0,0435	0,62	1,61
LG4_40kg/m ³	40	70	10	15	0,03413	0,49	2,05
		70	25	15	0,03895	0,56	1,8
		70	40	15	0,04245	0,61	1,65

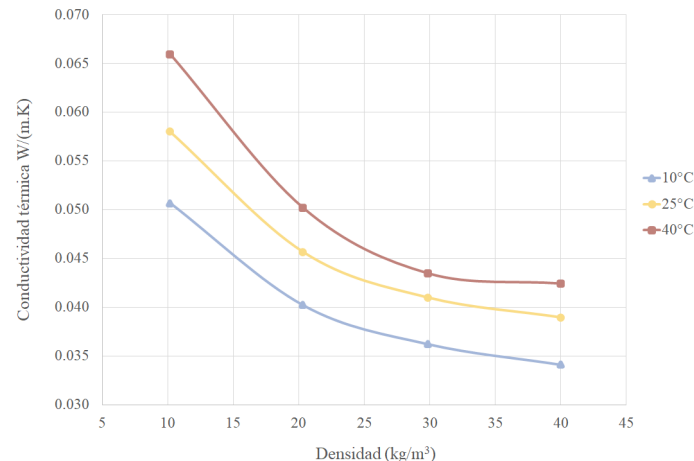


Fig. 3: Relación entre la conductividad térmica y la densidad de la lana ovina a granel medida en 10°C, 25°C y 40°C

mica, $0,034\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, corresponde a 40kg/m^3 medida a 10°C . Por otro lado, la muestra con mayor conductividad, $0,066\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, es la de 10kg/m^3 a 40°C . Para una temperatura media de 25°C , entre una muestra de 10kg/m^3 y otra de 40kg/m^3 , hay una diferencia de $0,019\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. En la Figura 3, se muestra la relación de dependencia entre el coeficiente de conductividad térmica y la densidad del material. Esto es, en la medida que la muestra presenta mayor densidad, los coeficientes de conductividad térmica medidos disminuyen. Sin embargo, la variación disminuye al ensayar muestras con densidades mayores a 30kg/m^3 .

Es posible entonces interpretar que, en la lana aplicada a granel, a mayor densidad se logra un mejor comportamiento aislante, con valores más bajos de conductividad térmica. Los mejores resultados se obtienen con la muestra de 40kg/m^3 , sin embargo, con menores densidades, a partir de 30kg/m^3 , se obtienen resultados muy similares, con diferencias en la conductividad menores al 10%. En estado estacionario con una temperatura media de 25°C , al utilizar un espesor de 70mm, la transmitancia térmica del material, es menor a $0,85\text{Wm}^2\text{K}^{-1}$ incluso con 10kg/m^3 , y por lo tanto se cumple con los parámetros establecidos en la normativa local para cerramientos verticales e inclinados.

A partir de 20kg/m^3 , la conductividad térmica de la lana de oveja se ubica en el orden de los aislantes convencionales. Como referencia normativa, para EPS (Poliestireno expandido) (EN 13163) los valores declarados típicos están en $0,033$ y $0,040\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (por ejemplo, de $0,033$ a $0,037\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ en la tabla de materiales de ASHRAE Fundamentals), y para lana mineral (vidrio/roca)

(EN 13162) en $0,037$ y $0,042\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, coherentes con las tablas de materiales de ASHRAE Handbook—Fundamentals (2021) y con los criterios de ISO 10456 para valores declarados/de diseño.

2.3 Desempeño energético de una vivienda aislada con lana ovina

Caso de estudio MEVIR

Se entiende que, en principio, resulta pertinente el análisis de una vivienda implantada en una zona rural, ya que la lana de oveja es un recurso disponible en este medio y que se puede llegar a aprovechar con facilidad, sobre todo aquella lana que usualmente se descarta como residuo. Es decir, existe un gran potencial en la apropiación del recurso para su implementación, en la medida en que los conocimientos sobre el manejo del material ya están en gran parte adquiridos por las personas del entorno rural. Es por esto que, con el fin de evaluar los efectos de este material aislante en una obra edilicia, se toma como caso de estudio una tipología de vivienda de tres dormitorios del programa de vivienda social rural MEVIR (Movimiento para la Erradicación de la Vivienda Insalubre Rural).

De acuerdo a las características de la implantación del programa MEVIR, las viviendas se encuentran apareadas, o sea, uno de sus muros es medianero, y generalmente se organizan en conjuntos habitacionales nucleados en lotes a través de un amanzanado regular. Por lo tanto, las viviendas presentan distintas orientaciones cardinales según su posición en el plano. Según la Figura 4, la vivienda tiene un área interior de aproximadamente 57m^2 y

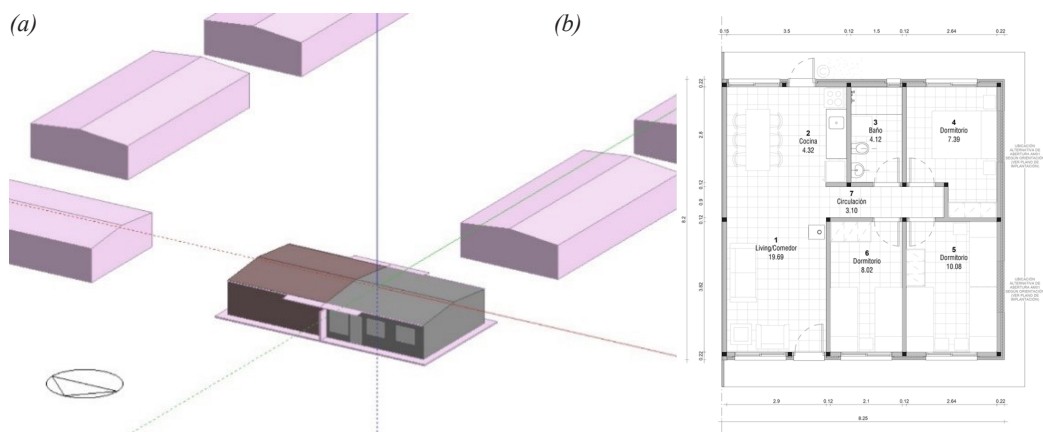


Fig. 4: (a) vista axonométrica del caso de estudio modelado en Desing Builder (DB), (b) planta equipada

está conformada por un ambiente de living/comedor vinculado espacialmente a la cocina, un baño, tres dormitorios y un área de circulación o pasillo. En este caso, la vivienda se estudia con la fachada de acceso ubicada hacia el norte, de esta forma, el living/comedor y dos de los dormitorios están orientados hacia el norte, mientras que el área de servicio (cocina y baño) se encuentra orientada al sur, así como el otro dormitorio.

Clima y confort en Salto, Uruguay

El sitio de implantación para este caso de estudio, se encuentra en el departamento de Salto, Uruguay, que está ubicado en la zona más cálida del país. De acuerdo a la zonificación climática establecida en la norma UNIT 1026:99 (1999), se demarcan en Uruguay tres zonas climáticas: zona IIb cálida, zona IIIb templada cálida y zona IVd templada fría. A Salto, le corresponde la zona IIb cuya estación crítica es el verano, con temperaturas máximas que superan los 30°C, según lo indica la norma. En concordancia, el Mapa Solar del Uruguay (Alonso-Suárez et al., 2017) muestra mayores promedios de irradiación diaria en el norte del país, donde se sitúa Salto. De todas formas, existen periodos estacionales bien diferenciados a lo largo del año. El período frío también se hace presente con temperaturas medias entre 8°C y 12°C durante el invierno según UNIT (1999). Estas condiciones plantean un doble requisito de diseño: control de sobrecalentamiento (sombreamiento y ventilación) en verano y retención/gestión de calor (masa térmica y aislación) en invierno.

Para el Año Meteorológico Típico (TMY) de la localidad de Salto (Alonso-Suarez et al., 2019), analizado a través de Climate Consultant (UCLA, 2021), se distinguen los datos suministrados en la Tabla 2, para el mes más comprometido del período caluroso y del período frío. Allí, se puede visualizar que la humedad relativa promedio durante enero y julio no supera el porcentaje máximo calculado para el modelo de confort; la temperatura media durante enero se encuentra en el valor máximo límite de la zona de confort, mientras que la temperatura máxima media está 7°C por encima de ese valor; y las temperaturas en julio se encuentran por debajo del rango de confort para el período frío.

Esto indica que, durante el verano, es conveniente que la temperatura interior de los locales sea menor a la temperatura media del ambiente exterior para que los usuarios se encuentren en confort. Por lo tanto, el diseño debe reducir cargas solares

e internas mediante sombreado exterior efectivo de aberturas, control de asoleo y, si aplica, vidrios de baja transmitancia solar; y favorecer el enfriamiento por ventilación (cruzada). La amplitud térmica diaria de enero (~13°C) habilita la ventilación nocturna de purga para descargar la masa térmica, estrategia pasiva eficaz cuando la temperatura exterior nocturna desciende por debajo de la interior.

Parámetros del modelo numérico

El desempeño energético se evalúa mediante simulaciones dinámicas de un modelo numérico de la vivienda y su entorno en *DesignBuilder v7.0.2* (2022), que utiliza el motor *EnergyPlus 9.4*. El sitio se caracteriza con el TMY de Salto. Dado el emplazamiento rural, se adopta la exposición al viento máxima (sin apantallamiento). El terreno se representa con el esquema de “dominio de terreno”. Para el dimensionamiento, se emplean días de diseño derivados del TMY: refrigeración con el mes crítico estival y calefacción con el mes crítico invernal.

Se definen perfiles de ocupación por zona térmica (horario y nivel de actividad) y densidades de ocupación según ASHRAE Handbook—Fundamentals (2021), a efectos de modelar las cargas internas. Se incorporan equipos por local con su fracción radiante y sensible/latente correspondiente. La envolvente (suelo sobre terreno, muros exteriores, particiones interiores y cubierta) se modela por capas con propiedades termo-físicas asignadas a partir de los detalles constructivos de MEVIR. La cubierta a dos aguas se extiende sobre las fachadas N y S, funcionando como alero sobre living y cocina respectivamente; estos elementos se representan como bloques de componente para capturar su efecto de sombreado.

Se diseña el entorno inmediato a través de bloques de componente que representan la volumetría y altura de las viviendas del conjunto y su acción de sombreado y obstrucción del viento. Dado que la unidad es apareada, el muro oeste colinda con un espacio de condiciones térmicas similares; por ello se modela con condición de contorno adiabático, es decir, sin intercambio de calor con el exterior. A efectos del cálculo, este muro se trata como partición interior (mismas capas y propiedades) para evitar sobreestimar pérdidas o ganancias por esa medianera.

Las ventanas son corredizas, de aluminio, con vidrio simple y

Tabla 2: Datos climáticos para el Año Meteorológico Típico de Salto, Uruguay

Ubicación geográfica		Rangos de Confort (ASHRAE Std. 55)	
Latitud (° S)	32,27	HR máxima (%)	84,6
Longitud (° W)	57,88	tx en verano (°C)	26,7
Altitud (m)	50	tn - tx en invierno (°C)	20,3 – 24,3
Promedios típicos de Salto			
Magnitud	Enero	Julio	
HR (%)	62	77	
txm (°C)	34	19	
tm (°C)	26	13	
tnm(°C)	21	9	
A (°C)	13	10	
vv (m/s)	4	3	
dv	NE-SE	NE	

HR: humedad relativa, tx: temperatura máxima, tn: temperatura mínima, txm: temperatura máxima media, tm: temperatura media, tnm: temperatura mínima media, A: amplitud térmica, vv: velocidad del viento, dv: dirección frecuente del viento.

ubicadas a filo interior. Su porcentaje de apertura se establece entonces en un 50% y el funcionamiento de la apertura se configura de acuerdo al horario de ocupación establecido para cada local. No se colocan elementos de sombreado o protección exterior en las aberturas. Los parámetros de iluminación también se programan de acuerdo al horario de ocupación de cada zona con un porcentaje de uso determinado, y se prioriza el horario activo nocturno de ocupación. Los niveles de iluminación requeridos se calculan en base a la incorporación de la cantidad necesaria de lámparas led.

En las opciones del modelo, se configura la ventilación natural calculada, esto es, la simulación energética utiliza los parámetros de velocidad y dirección del viento proporcionados por el archivo climático y del funcionamiento programado para las aberturas para calcular las tasas de ventilación de los ambientes. De esta manera, se puede evaluar de forma más aproximada a la realidad cuál es el potencial de ventilación que tiene el diseño arquitectónico en el sitio de emplazamiento.

Para simular el consumo energético artificial de forma tal que los usuarios se encuentren en situación de confort todas las horas del año, se define un sistema de HVAC de alimentación eléctrica para calefaccionar y refrigerar a través de equipos de aire acondicionado “split inverter” ubicados en las zonas habitables. Para este

caso, además se activa la ventilación natural calculada en modo mixto, es decir, se alterna el funcionamiento de la ventilación natural y el sistema de HVAC definido por lo que se reduce la carga de acondicionamiento artificial cuando no es necesario. Las consignas de temperatura empleada son de 18°C para calefacción y de 26°C para refrigeración

3. RESULTADOS

Para evaluar el efecto de la masa térmica aislada se comparan dos escenarios: (i) modelo base (MB), sin aislante en los cerramientos opacos; y (ii) modelo aislado (MA), en el que se sustituye parte de la cámara de aire por lana ovina a granel en muros exteriores y cubierta. En el MA se incorpora una capa de lana con las siguientes características: espesor de 0,05m, densidad de 20kg/m³, calor específico de 1300J/(kg·K) y conductividad térmica de 0,0443W·m⁻¹·K⁻¹. El resto de la geometría, la ocupación y las cargas internas se mantienen idénticas entre los modelos MB y MA.

La Tabla 3 resume los datos de transmitancia térmica (U), resistencia térmica (R) (el cálculo incluye los puentes térmicos) y de capacidad térmica (CT) de cada cerramiento. En la Figura 5, también se puede apreciar la conformación de la solución constructiva empleada para los muros exteriores y la cubierta.

Tabla 3: Valores de U, R, CT y espesor de cerramientos del MB y el MA

	U [W/(m ² ·K)]	R [(m ² ·K)/W]	CT [kJ/(m ² ·K)]	espesor (m)
Muro exterior (MB)	0,98	1,02	277	0,22
Muro exterior aislado (MA)	0,49	2,03	279	0,24
Cubierta (MB)	1,87	0,54	46	0,07
Cubierta aislada (MA)	0,65	1,54	49	0,09
Muro medianero (MB y MA)	2	0,5	461	0,31
Muros interiores (MB y MA)	2,45	0,41	189	0,13
Suelo sobre terreno (MB y MA)	3,81	0,26	144	0,08

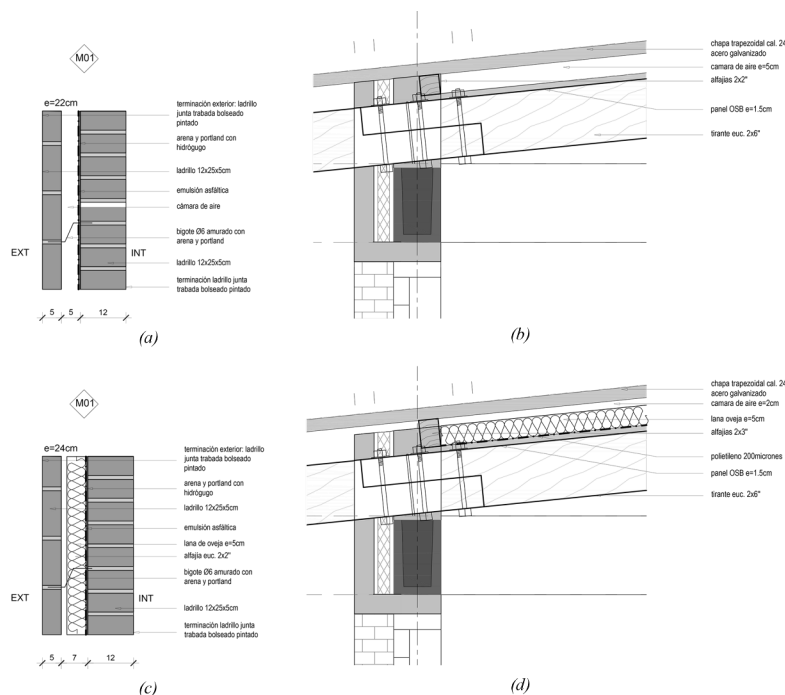


Fig. 5: Detalles constructivos para MB y MA, (a) muro exterior, (b) cubierta, (c) muro exterior aislado, (d) cubierta aislada

El muro exterior de ladrillo de campo posee una CT mayor a $150\text{kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, lo que indica buena inercia y atenuación de oscilaciones interiores. El muro exterior del MB presenta una U mayor a $0,85\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, por lo tanto, este cerramiento no cumple con el requisito establecido en la normativa municipal de referencia (Intendencia de Montevideo, s. f.). Sin embargo, al incorporar el material aislante en el cerramiento, se logra reducir considerablemente este valor y se obtiene una de U de $0,49\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Se puede deducir entonces que el cerramiento del MB, incluso al adoptar una cámara de aire en la solución constructiva, no logra alcanzar un valor de transmitancia térmica adecuado y es necesario la incorporación de un material aislante para aumentar su resistencia térmica y así amortiguar de forma más eficiente el flujo de calor. El MA en cambio, presenta cerramientos exteriores con mejor capacidad de inercia térmica y el material aislante incide en su capacidad para resistir al paso del calor y al cambio de temperatura.

En el caso de la cubierta liviana, resulta fundamental incluir el material aislante para alcanzar valores óptimos de transmitancia térmica. Se puede visualizar como en el MB la cubierta presenta una U muy por encima del máximo admisible [$1,87\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}) > 0,85\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]. Al añadir la lana de oveja en un espesor de $0,05\text{m}$ y una cámara de aire de $0,02\text{m}$, se logra una U de $0,65\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ para la cubierta aislada.

El confort se evalúa con simulaciones en modo pasivo (HVAC desactivado) con el parámetro de confort calculado en base al modelo de confort adaptativo ASHRAE Standard 55 (2010), con un criterio de 90% de aceptabilidad sobre la temperatura operativa por zona térmica a lo largo del año. La Tabla 4, resume el porcentaje de horas al año en que los principales ambientes habitables presentan una temperatura interior dentro del rango de confort adaptativo establecido para cada mes del año, o de lo contrario se encuentran en una situación de desconfort. Allí, se puede notar que en general, durante todo el año el MA aumenta la

cantidad de horas en los que la temperatura operativa está dentro del rango de confort, es decir, la situación de confort mejora para los habitantes entre un 1% y un 6% de horas al año según la zona térmica. No obstante, mientras que el desconfort por frío disminuye considerablemente durante el invierno, el desconfort por calor tiende a aumentar durante los meses calurosos; esto es claramente un efecto de la masa térmica aislada incorporada en el MA. Los locales disminuyen el desconfort por frío entre 9% y 12% y aumentan el desconfort por calor entre 6% y 8% de las horas anuales. De todas formas, es necesario evaluar medidas de mitigación de este efecto negativo durante el verano, ocasionado por la masa térmica aislada, como condiciones de ventilación adecuadas e incorporación de sobrevolados para el control de la radiación solar incidente sobre los cerramientos transparentes.

Las gráficas de balance energético mensual por componente, Figura 6, muestran pérdidas netas (barras negativas) a través de la cubierta y los muros para el MB y el MA. En todos los meses el MA reduce las pérdidas respecto del MB, con el máximo efecto en invierno (pico en julio), cuando el gradiente térmico es mayor. La cubierta concentra la mayor mejora, la separación entre series es mucho más amplia que en los muros y mantiene una reducción sistemática también en los meses templados. En los muros, la disminución es más moderada pero constante a lo largo del año. En conjunto, las gráficas confirman que la mejora de U en la envolvente, especialmente en la cubierta, domina el balance térmico y sustenta la caída de la demanda de calefacción del modelo aislado. Anualmente se ve un beneficio del 11,6% en los muros y del 56,4% en la cubierta.

Finalmente, se evalúa la operación con HVAC en ambos modelos: se activa calefacción en invierno y refrigeración en verano para cumplir las consignas de 18°C y 26°C respectivamente, y se calcula la energía eléctrica anual requerida. La Figura 7 muestra que en el MA la demanda de calefacción es prácticamente nula, y la refrigeración se mantiene por debajo de la requerida en el MB

Tabla 4: Porcentajes de horas en confort y desconfort para las zonas térmicas del MB y del MA

Confort adaptativo anual (% de horas)									
Zona térmica	Conf. MB	Conf. MA	$\Delta\%$ Conf.	Disconf. por calor MB	Disconf. por calor MA	$\Delta\%$ disconf. por calor	Disconf. por frío MB	Disconf. por frío MA	$\Delta\%$ disconf. por frío
Living	53%	55%	2%	29%	37%	8%	18%	8%	-10%
Cocina	53%	54%	1%	35%	43%	8%	13%	4%	-9%
Dorm. 1	50%	54%	4%	13%	20%	7%	37%	26%	-11%
Dorm. 2	53%	59%	6%	13%	19%	6%	34,0%	22%	-12%
Dorm. 3	55%	60%	5%	15%	22%	7%	30%	19%	-11%

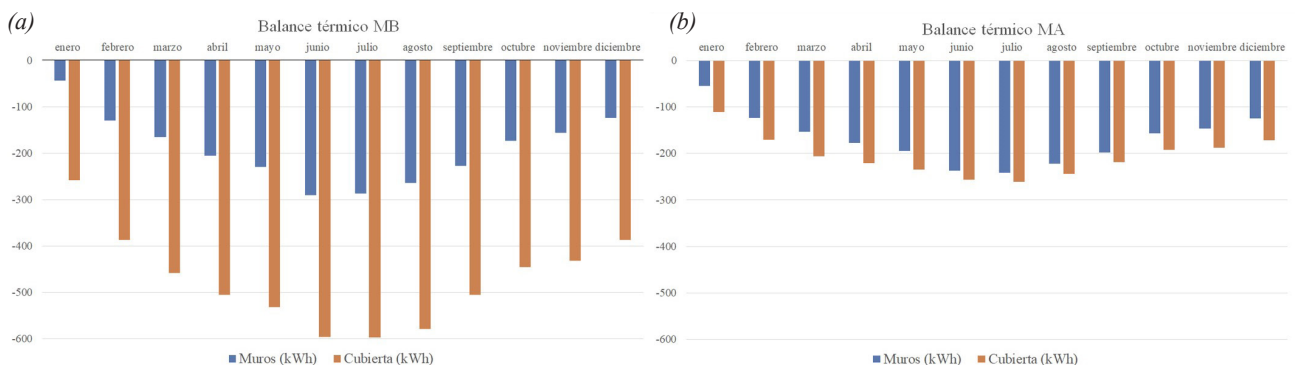


Fig. 6: Balance de energía mensual en el MB (a) y en el MA (b) para muros (azul) y cubierta (naranja)

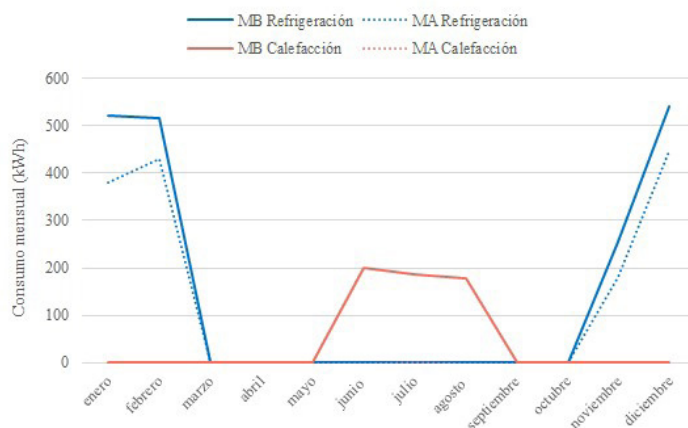


Fig. 7: Consumo energético mensual de refrigeración y calefacción eléctrica en el MB y en el MA

durante todo el período cálido. En conjunto, el MA reduce el consumo anual de acondicionamiento artificial un 40%, desagregado en $-23,5\%$ por calefacción y $-16,5\%$ por refrigeración, consistente con la mejora de U en los muros y, sobre todo, en la cubierta.

4. CONCLUSIONES

Si bien la industria textil ha desarrollado maquinarias que facilitan el proceso de lavado, escardado y peinado de la lana de oveja y además posibilitan un volumen de producción mayor en menor tiempo, en este caso se demuestra que un proceso de acondicionamiento artesanal de la lana también brinda buenos resultados del producto final obtenido para este fin constructivo. Y esto también puede suponer resultados positivos en el uso y apropiación del recurso, sobre todo en el medio rural, donde el material se encuentra ampliamente disponible y ya existen conocimientos adquiridos sobre el manejo de la lana.

La lana ovina acondicionada mediante lavado, tratamiento y escardado no industrial, muestra aptitud técnica para su uso como aislante aplicado a granel. La conductividad térmica se ubica entre $0,034$ y $0,066\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ($10\text{--}40^\circ\text{C}$) y disminuye al aumentar la densidad de la muestra, con una clara atenuación de la variación a partir de $\approx 30\text{kg}/\text{m}^3$. A partir de $20\text{kg}/\text{m}^3$, se alcanzan prestaciones térmicas elevadas, con valores comparables a los de aislantes convencionales reportados en la bibliografía, y con viabilidad constructiva en relación a la voluminosidad del material. Los ensayos MEB corroboran la eficacia del acondicionamiento al exponer la cutícula y reducir el contenido graso.

En el caso de estudio, incorporar 5cm de lana a $20\text{kg}/\text{m}^3$ redujo de forma sustantiva la transmitancia de la envolvente: los muros exteriores pasaron de $0,98$ a $0,49\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ y la cubierta de $1,87$ a $0,65\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, con cambios mínimos en la capacidad térmica (CT) de los elementos. Los balances mensuales por componente muestran que la cubierta concentra la mayor reducción de pérdidas, seguida por los muros, lo que explica la mejora global del comportamiento térmico del modelo aislado (MA) frente al modelo base (MB).

En modo pasivo (HVAC desactivado, modelo adaptativo ASHRAE 55, 90% de aceptabilidad), el MA aumentó las horas en confort entre $+1$ y $+6$ puntos porcentuales (p.p.), disminuyó el desconfort por frío entre -9 y -12 p.p., es decir, una reducción entre 30 y 55% respecto al caso base, y elevó el desconfort por calor $+6$ a $+8$ p.p. durante el período cálido, un incremento entre 27 y 50% respecto al caso base, efecto consistente con la masa térmica aislada. En

operación con HVAC (consignas $18/26^\circ\text{C}$), el consumo de energía artificial anual se redujo $\sim 40\%$, desagregado en $-23,5\%$ por calefacción y $-16,5\%$ por refrigeración. La coherencia entre la mejora de U, los balances por componente y la caída de demanda respalda la robustez de los resultados.

Desde el punto de vista de diseño, la lana ovina con una densidad entre 20 y $30\text{kg}/\text{m}^3$ surge como rango recomendado para obras de vivienda social por su equilibrio entre desempeño y constructibilidad. En climas cálidos como Salto (zona IIb), la aislación debe complementarse con sombreado exterior efectivo y ventilación nocturna, a fin de mitigar el aumento de desconfort estival y aprovechar la amplitud térmica. Para la comunicación normativa, es aconsejable explicitar el umbral de U utilizado como referencia y su jurisdicción.

A seguir, se entiende importante estudiar la sensibilidad higrotérmica (humedad/adsorción) y la durabilidad del material in situ. A escala del edificio, es conveniente evaluar la variabilidad de densidad alcanzada en obra y realizar un análisis de sensibilidad (infiltración, setpoints y estrategias de sombreado/ventilación) para optimizar el desempeño estival sin penalizar el invernal. En conjunto, los resultados validan a la lana ovina como solución local con impacto energético significativo y factible de transferencia a programas como MEVIR.

FUENTES DE FINANCIAMIENTO

La investigación que da origen a los resultados presentados en el presente trabajo recibió fondos de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación bajo el código POS_NAC_2023_1_178325. Además, se cuenta con el apoyo del Laboratorio de Energía Solar para la realización de ensayos y experimentos.

REFERENCIAS

- Aditya L., Mahlia T., Rismanchi B., Ng H.M., Hasan M.H., Metselaar H.S.C., Muraza O., Aditya H.B., H.B. (2017). A review on insulation materials for energy conservation in buildings, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 73, 1352–1365.
- Alonso-Suárez, R., Abal, G., Siri, R., & Muse, P. (2017). Mapa Solar del Uruguay. Laboratorio de Energía Solar. <http://les.edu.uy/online/msuv2/>
- Alonso-Suarez, R., Bidegain, M., Abal, G., & Modernell, P. (2019). Año Meteorológico Típico para aplicaciones de energía solar. Udelar. CSIC.

- American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). (2010). ASHRAE Standard 55. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.
- American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). (2021). ASHRAE Handbook Fundamentals.
- Antunes A., Faria P., Silva V., Bras A., (2019). Rice husk-earth based composites: a novel bio-based panel for buildings Re-fur-bishment, *Construct. Build. Mater.* 221, 99–108.
- Arquitesista (Director). (2024b, abril 15). Proceso de acondicio-namiento de lana ovina para aislación térmica. Lavado, tra-tamiento y secado [Video recording]. Laboratorio de Energía Solar. <https://www.youtube.com/watch?v=PVaim95Iatk>
- Asdrubali F., D'Alessandro F., Schiavoni S., (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials, *Sustain. Mater. Technol.* 4, 1–17.
- DesignBuilder Software Ltd. (2022). DesignBuilder (Versión 7.0.2.006) [Software].
- Espinoza, F., & Grünzacher, M. L. (2002). Manual de Conser-vación Preventiva de Textiles (Claudio Navarro B.). Comité Nacional de Conservación Textil. Dirección de Bibliotecas Ar-chivos y Museos. Fundación Andes.
- Giroudon M., Laborel-Preneron A., Aubert J.E., Magniont C., (2019). Comparison of barley and lavender straws as bio-aggre-gates in earth bricks, *Construct. Build. Mater.* 202, 254–265.
- Hegyi A., Bulacu C., Szilagyi H., Lazarescu A., Meita V., Vizureanu P., Sandu M., (2021). Improving indoor air quality by using sheep wool thermal insulation, *Materials* 14, 2443.
- Instituto de Ingeniería Eléctrica. (2018). HTERM (Versión 3.0) [Software]. Facultad de Ingeniería y Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo. UdelaR.
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT). (2020). UNIT ISO 8302:1991. Aislamiento térmico—Determinación de re-sistencia térmica en estado estacionario y propiedades relacio-nadas—Aparato de placa caliente de guarda.
- Intendencia de Montevideo. (s. f.). Digesto Departamental. Libro XVI Del Planeamiento de la Edificación. Título III.1 Normas para edificios destinados a vivienda. <https://normativa.montevideo.gub.uy/indice/82663>
- Korjenic A., Klaric S., Hadzic A., Korjenic S., (2015). Sheep wool as a construction material for energy efficiency improvement, *Energies* 8, 5765–5781.
- Liuzzi S., Rigante S., Ruggiero F., Stefanizzi P., (2016). Straw based materials for building retrofitting and energy effi-ciency, *Key Eng. Mater.* 678, 50–63.
- Pesok, J. C. (2004). La lana: Composición, estructura y propieda-des. En *Introducción a la tecnología textil*. <https://sites.google.com/site/introtecnotextil/03-la-lana-composicion-estructura-y-propiedades>
- Pinto J., Cruz D., Paiva A, Pereira S., Tavares P., Fernandes L. Va-rum H., (2012). Characterization of corn cob as a possible raw building material, *Construction and Building Materials*, Volume 34, Pages 28-33, ISSN 0950-0618.
- Reif M., Zach J., Hroudova J., (2016). Studying the properties of particulate insulating materials on natural basis, in: *Procedia Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.390>.
- Rojas C., Cea M., Iriarte A., Valdés G., Navia R., Cárdenas J.P., (2019). Thermal insulation materials based on agricultural re-sidual wheat straw and corn husk biomass, for application in sustainable buildings, *Sustain. Mater. Technol.* 20.
- UCLA. (2021). Climate Consultant (Versión 6.0) [Software]. The Society of Building Science Educators an Association of Uni-versity Educators and Practitioners.
- UNIT. (1999). Norma UNIT 1026: 1999. Aislamiento térmico de edificios. Zonificación climática. Instituto Uruguayo de Nor-mas Técnicas.
- Zach J., Korjenic A., Petranek V., Hroudova J., Bednar T., (2012). Performance evaluation and research of alternative thermal insulations based on sheep wool, *Energy Build.* 49, 246–253.