

DESEMPEÑO HIGROTÉRMICO DE UNA VIVIENDA DE QUINCHA EN ALTA MONTAÑA ANDINA DURANTE EVENTOS CLIMÁTICOS Y MODIFICACIÓN DE SU ENVOLVENTE

Maria Laura Giovino¹ y Pablo Dellicompagni¹

¹Consejo Nacional de investigaciones científicas y técnicas - CONICET. Centro Internacional de Ciencias de la Tierra – (ICES) Mendoza. Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat (IRPHa) - Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño (FAUD), Universidad Nacional de San Juan (UNSJ).
Av. Ignacio de La Roza y Meglioli – 5400 San Juan – Tel.:+54(0)264 423 2395 e-mail: arq.mlgiovino@gmail.com

Recibido 07/2023; Aceptado 07/2023

RESUMEN.- En este trabajo se analiza el comportamiento térmico de una vivienda construida con tecnología de quincha, ubicada en la zona andina de alta montaña (Potrerillos), correspondiente a la zona bioambiental V- Fría. Para ello se realizó un monitoreo higrotérmico para dos situaciones diferentes de la vivienda según el aumento de la masa de la envolvente de tierra y durante ola de calor y de frío. Se determinó que el incremento de masa de tierra en la envolvente no resultó favorable como estrategia bioclimática para verano al superar las temperaturas de confort. Por lo contrario, en invierno, dicha estrategia se comportó favorablemente alcanzando niveles de confort máximo de 33%, dado a que acumuló calor y amortiguó la diferencia de temperatura exterior-interior. En verano la energía térmica total a extraer para lograr confort se duplicó (aumentó un 95%), mientras que, en invierno, la energía térmica total necesaria para calefaccionar se redujo en un 32%. En base a los resultados, se evidenció que el incremento de tierra mejora el grado de confort en invierno, pero desfavorece al confort en verano. Es necesario la integración de estrategias bioclimáticas adicionales para evacuar el exceso de calor acumulado en el interior durante el verano.

Palabras clave: Arquitectura bioclimática, tierra, confort térmico, energía térmica, Potrerillos.

HYGROTHERMAL PERFORMANCE OF A QUINCHA DWELLING IN HIGH ANDEAN MOUNTAINS, DURING CLIMATIC EVENTS AND MODIFICATION OF ITS ENVELOPE

ABSTRACT.- In this study, the thermal behavior of a house constructed using quincha technology, located in the high mountain Andean region (Potrerillos) corresponding to the bioenvironmental zone V- Cold, is analyzed. Hygrothermal monitoring was conducted for two different situations of the house based on the increase in the mass of the earth envelope, during both heatwaves and cold spells. It was determined that the increase in earth mass in the envelope did not favorably impact summer as a bioclimatic strategy, as it exceeded comfort temperatures. On the contrary, it behaved favorably during winter, reaching maximum comfort levels of 33%. This strategy effectively accumulated heat and mitigated the temperature difference between the exterior and interior. In summer, the total thermal energy required to achieve comfort doubled (increased by 95%), while in winter, the total thermal energy required for heating decreased by 32%. Based on the results, it was evident that the increase in earth mass improved the degree of comfort during winter but disadvantaged comfort during summer. Additional bioclimatic strategies are necessary to dissipate the excess accumulated heat indoors during the summer.

Keywords: Bioclimatic architecture, earth, thermal comfort, thermal energy, Potrerillos.

1. INTRODUCCIÓN

La búsqueda de soluciones constructivas sostenibles ha llevado a explorar materiales y técnicas que proporcionen ventajas en términos de confort térmico, ahorro energético y cuidado del medio ambiente. Entre estas alternativas, las viviendas construidas con las técnicas de construcción con tierra, como la quincha, se destacan por su capacidad para regular la temperatura de forma natural (Giovino, 2016). Las técnicas constructivas que emplean

la tierra como principal material presentan ventajas en términos de su desempeño para el confort ambiental, debido a las propiedades de inercia térmica la cual permite la acumulación de calor (Wieser et al., 2020). De acuerdo con Gálvez (2002 en Roux Gutiérrez, R. S.; Gallegos Sánchez, D. P., 2015) la inercia térmica se la denomina a la resistencia que presentan los cuerpos para variar su temperatura, acumulando la energía que reciben en su interior. De esta forma, los muros de tierra puedan emplearse como estrategia bioclimática, capaces de acumular calor y amortiguar

las diferencias de temperatura con respecto al exterior (Giovino, 2022). De esta manera, se reduce la necesidad de sistemas de refrigeración y calefacción.

El sector residencial representa el 29% del consumo energético de acuerdo con el Balance Nacional, y a su vez, el mayor consumo lo constituye el acondicionamiento térmico siendo un 35% para calefacción y 5% para refrigeración de acuerdo con los datos de Tep/hogar emitidos por la secretaría nacional de energía (Secretaría de Energía, 2016). En climas fríos, de alta montaña como lo es en Potrerillos donde se sitúa el caso de estudio, las temperaturas pueden descender hasta los -10°C . Esto se corresponde a la zona bioambiental V - fría, según norma IRAM 11603 (2012). En Potrerillos también se ha detectado que el requerimiento de calefacción se satisface por el uso de biomasa en salamandras, estufas, etc. Sin embargo, el uso de leña para calefacción de la vivienda no contribuye a resolver la problemática de desertificación que sucede en las zonas áridas.

La sustentabilidad edilicia permite tomar en cuenta los aspectos más relevantes del consumo de energía de los edificios y determinar la forma de disminuir los costos energéticos. En cuanto a los estudios de eficiencia energética en edificios, Passivhaus (1988) es uno de los primeros referentes internacionales en edificios de bajo consumo energético. La visión de Net Zero Energy Building (NZEB) se trata de generar edificios de eficiencia energética, de modo que la tecnología de energía renovable aporte energía suficiente para igualar o exceder el consumo que se requiere del mismo. Controlar un acondicionamiento pasivo es pertinente para lograr un adecuado desempeño edilicio y mitigar el excedente de energía en los casos de refrigeración. (O'Donovan, A., Murphy, M.D., O'Sullivan, P. D., 2020). En concordancia con esta línea, la arquitectura bioclimática y la implementación de estrategias pasivas aportan de igual manera a la eficiencia energética edilicia tras adaptar la vivienda al clima y con ello poder satisfacer los requerimientos energéticos sin consumo activo de energía.

Asimismo, adaptarse no solo al clima sino al recurso material local disponible en el sitio conlleva a utilizar técnicas constructivas a base de tales materiales como la tierra, y la implementación de técnicas como la quincha. Además, la tierra es un recurso natural renovable y puede reciclarse. (CRATerre, 2016). La escasez de recursos constituye otro de los factores en cuestión por lo cual es necesario el uso de materiales alternativos. En nuestro país, las técnicas constructivas específicas y de mayor alcance para este material son la quincha y el adobe y en menor medida la tapia y el Bloque de tierra comprimida (BTC), entre otros. En Mendoza, solo en algunos departamentos se permite la construcción de viviendas con tecnología de quincha mejorada como lo es en Las Heras, San Carlos, Junín y Malargüe (Red PROTIERRA Argentina, 2021).

La quincha es una tecnología constructiva en la cual se configura una estructura de madera que soporte las cargas del techo y del muro. Se realizan bastidores con un entramado de caña que da forma al muro. Por lo tanto, un muro en quincha no es portante sino su esqueleto en madera es quien absorbe las cargas y el relleno de tierra colabora con la misma. El proyecto de ordenanza de la red Protierra Argentina (2021) la clasifica como una técnica mixta de muros perteneciente a la familia de los entramados. Consiste entonces en un bastidor de madera con entramado relleno con una mezcla de barro y fibras vegetales.

El desempeño térmico se refiere a la propiedad de los cerramien-

tos verticales y horizontales (CVyH) de los edificios para oponerse a la transmisión de calor o acumularlo. La inercia térmica de la tierra permite el retardo térmico ocasionando una amortiguación de la temperatura exterior-interior (IRAM 11549, 2002). En este sentido, en aquellos edificios en los que se usa la tierra como material de construcción, existen estos dos comportamientos, de acuerdo con su nivel de aislamiento o la energía acumulada por el material (Wieser et al., 2018). Por lo tanto, debido a la inercia térmica de la tierra, las viviendas de quincha pueden presentar ventajas en su comportamiento térmico, logrando acumular el calor en el ambiente interior. En invierno entonces, la masa de la tierra puede actuar como un acumulador térmico. (Fuentes Frexainet V.A, 2001). Los autores Roux Gutiérrez, R.S.; Gallegos Sánchez, D. P., (2015) comprobaron tras los ensayo de los muros de BTC que una vivienda con dicha técnica pueda resultar más fresca en verano y más caliente en invierno que un muro de hormigón o ladrillo.

Por otro lado, para determinar un desempeño térmico adecuado es necesario evaluar si el ambiente interior alcanza un confort térmico. De acuerdo con la definición de ASHRAE 55 (2017) el confort térmico es definido como el estado de ánimo o de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico y se evalúa mediante valoración subjetiva. Una manera de determinarlo es a través de la predicción del voto medio (PMV) el cual es un índice que predice el valor medio de los votos de un amplio grupo de personas a partir de una escala de sensación térmica (+3 caliente, +2 cálido, +1 ligeramente cálido, 0 neutro, -1 ligeramente frío, -2 frío, -3 muy frío). El índice de confort térmico PMV se puede calcular al considerar la actividad metabólica, la resistencia térmica de la ropa y la medición de los siguientes parámetros ambientales: temperatura del aire, temperatura radiante promedio, temperatura radiante media, velocidad relativa del aire y presión parcial de vapor de agua. (ISO 7730:1994; ISO 7726).

Este artículo se centra en el estudio del comportamiento higrotérmico de una vivienda construida con la técnica de quincha, que utiliza la tierra como material principal. La evaluación se realiza para durante episodios climáticos de ola de calor y frío. Esta evaluación se realiza, a su vez, en dos fases: la primera fase con muros de tierra y la segunda con aumento del espesor de tierra en paredes y cubierta. Se determinó el grado de sensación de confort térmico y el requerimiento de energía térmica tanto a evacuar como a inyectar.

2. METODOLOGÍA

El trabajo consta de un análisis cuantitativo de carga térmica, energía requerida y confort térmico a través del registro de temperatura y humedad relativa del aire interior y exterior de la vivienda. Los análisis de los registros medidos corresponden a un día extremo de la estación cálida y otro de la estación fría para dos momentos diferentes de la vivienda.

2.1. Arreglo experimental

Para el registro de los datos se emplearon dataloggers HOBO U12 a intervalos de 10 minutos. Los sensores higrotérmicos son de la firma HOBO Onset Modelo UX100-003. Estos registran temperatura de bulbo seco y humedad relativa en un rango de -20°C a $+70^{\circ}\text{C}$ y de 15% a 95% HR, respectivamente. Los sensores tienen una exactitud de $\pm 0,21^{\circ}\text{C}$ (de 0 a 50°C) y $\pm 3,5\%$ HR (de 25% a 85%) y se instalaron en el espacio interior principal en planta baja (sensor 1), en el dormitorio en la planta alta (sensor 2) y en la galería (sensor 3), como se indica en la Figura 1.

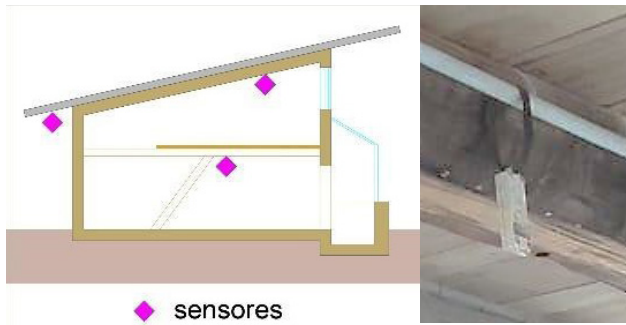


Fig. 1. Esquema y ubicación de los sensores higrotérmicos.

2.2. Monitoreo higrotérmico

Para el análisis del monitoreo se seleccionaron los días más desfavorables para la estación cálida y fría de modo de poder evaluar el comportamiento higrotérmico en un día representativo crítico cuando las temperaturas exteriores alcanzan los valores extremos, en el caso de las temperaturas de verano se registraron durante los episodios de ola de calor sucedidos durante diciembre del 2020 y diciembre del 2022 y la ola de frío del 2023 registrados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2020; 2022). A su vez, el registro se realizó para dos fases de acuerdo con las modificaciones que se le hicieron a la envolvente según el incremento de la masa de tierra de esta. De esta forma, se seleccionaron los días 21 de diciembre y 24 de julio del año 2020 al que denominamos fase 1, y los días 14 de diciembre del 2022 y 13 de junio del año 2023 a la que establecemos como la fase 2, como se sintetiza en la tabla 1.

Tabla 1. Fechas seleccionadas para el análisis de acuerdo con las características de la envolvente.

Estación	Fase 1 Envolvente delgada	Fase 2 Envolvente aumentada
Cálida	21-12-2020	14-12-2022
Fría	24-07-2020	13-06-2023

Dado que las variables climatológicas de año a año cambian, y el día crítico de un año no coincide en las fechas con un día crítico en otro periodo, se ha monitoreado una serie de días para poder contar con registros diversos, de esta manera para el segundo periodo se seleccionaron para el análisis los días con características similares al día seleccionado en el periodo de la fase 1.

2.3. Requerimiento energético y carga térmica

Para determinar la carga térmica y con ello la energía requerida en la vivienda, tanto del calor a inyectar (para invierno) o del calor a evacuar (en verano) se se emplearon las fórmulas típicas de almacenamiento de energía térmica en una masa de aire (Duffie, Beckman, 2005). Las Ecuaciones 1 y 2 determinan la cantidad de energía térmica que se deberá inyectar o extraer si la temperatura de los recintos supera el valor máximo de temperatura de confort

o si se encuentra por debajo de la temperatura mínima de confort, respectivamente.

$$Q_{ex} = V_a \rho_a C_{pa} \Sigma(T_{ai,i} - T_{c,m\acute{a}x}), \text{ si } T_{ai,i} > T_{c,m\acute{a}x} \quad (1)$$

$$Q_{in} = V_a \rho_a C_{pa} \Sigma(T_{ai,i} - T_{c,m\acute{i}n}), \text{ si } T_{ai,i} < T_{c,m\acute{i}n} \quad (2)$$

Donde.

Q_{ex} : Calor a extraer, J.

Q_{in} : Calor a inyectar, J.

V_a : Volúmen de aire del recinto en cuestión, m³.

ρ_a : Densidad del aire, adoptada 1005,2 kg/m³.

C_{pa} : Calor específico del aire, adoptado 1005,2 J/kg°C.

$T_{ai,i}$: Temperatura del aire medida, °C. El subíndice "i" corresponde a la i-ésima medición registrada.

$T_{c,m\acute{a}x}$: Temperatura máxima de confort adoptada según ASHRAE 55, 22°C.

$T_{c,m\acute{i}n}$: Temperatura mínima de confort adoptada según ASHRAE 55, 18°C.

2.4. Análisis de confort térmico

En las ecuaciones 1 y 2 se definieron los rangos de temperatura de confort de acuerdo con la norma ASHRAE 55 (2017), la cual define dicho rango entre 18°C y 22°C. Para los cálculos de confort térmico se empleó el software SIMEDIF. La sensación térmica (PMV) se expresa mediante una representación visual en colores. Para el cálculo de PMV se utilizaron los valores de temperatura y humedad relativa registrados durante el monitoreo, junto con los índices de arropamiento (clo) correspondientes a 0,5 clo en verano y 1,1 clo en el interior durante el verano y 1,3 clo en el exterior durante el invierno. Además, se consideraron una tasa metabólica (met) de 1,3 met y una velocidad del aire de 0,1 m/s.

2.5. Caracterización climática del sitio

La vivienda se sitúa en la localidad de Potrerillos, en el departamento Luján de Cuyo, Mendoza, donde la ecorregión es árida y semiáridas de montaña y la zona bioambiental corresponde V-fría según la Norma IRAM 11603 (2011) como se observa en la Figura 2, donde se presenta el mapa de zonas bioclimáticas de la provincia de Mendoza. Potrerillos se encuentra en el departamento de Luján de Cuyo, Mendoza. Para esta localidad, el requerimiento anual de calefacción, medido en grados día (con una temperatura base de 18°C), es de 29 °C día/año y el valor medio diario anual de radiación solar es 18,1MJ/m²día]. Las temperaturas se caracterizan por una gran amplitud térmica diaria, en rangos medios de 20°C (Esteves et al., 2012). Los vientos en Potrerillos son notoriamente fuertes y con frecuencias intermitentes siendo el viento zonda el predominante del sitio, el cual consta de aire caliente seguidos de un descenso de la temperatura. Este viento puede generar ráfagas que alcanzan velocidades de hasta 100km/h. Además, durante el verano, la presencia de granizo, y en invierno, las heladas pueden dificultar el tránsito por las vías terrestres y provocar el aislamiento temporal de las villas de montaña.

De acuerdo con estas características y condiciones climáticas, el diagrama psicrométrico de Givoni sugiere como estrategias bio-

climáticas para garantizar el confort térmico en invierno sistemas solares pasivos (SSP), así como mantener una masa térmica y reducir las ganancias internas, mientras que, en verano, se puede utilizar la refrigeración nocturna con recursos naturales.

En los días seleccionados para el monitoreo, el clima tuvo la particularidad de los episodios de ola de calor sucedidos durante diciembre del año 2020 y 2022. En ambos episodios fue afectado el Norte de la provincia de Mendoza. De acuerdo con el informe especial n°3 por ola de calor / altas temperaturas temporada 2022-2023 (SMN, 2022), la ola de calor de diciembre del año 2022 señaló valores de temperatura históricos que llegaron a un máximo de 31°C a 36° con mínimas de 15.9°C a 19.1°C durante 8 días en Uspallata y un máximo de 36,3°C y 38,3°C, con mínimas de 22°C a 24,8°C durante 5 días en la ciudad de Mendoza. A nivel nacional, los máximos detectados durante este evento fueron de 46°C en Rivadavia, 44°C en Tucumán, entre otras provincias afectadas.

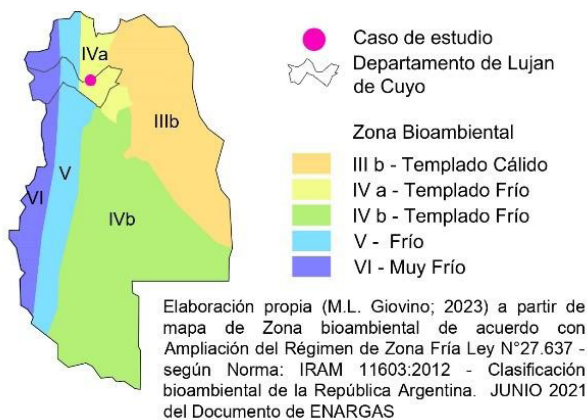


Fig. 2. Mapa de zonas bioclimáticas con ubicación de la vivienda. Fuente: Elaboración propia en base a la clasificación bioambiental de Norma IRAM 11603 y de acuerdo con la ley de ampliación de Régimen de zona fría.

2.6. Descripción del objeto de estudio

La vivienda consta de dos pisos en el cual el primero constituye una sala de estar-comedor y cocina integrados, más un baño con una superficie de 46,24 m² y un volumen de 102,6 m³, mientras que en primer piso se sitúan los dormitorios 15 m² y un volumen de 37,3 m³.

Las características constructivas se detallan para cada fase. En la fase 1, la envolvente se componía de un muro de quincha con un espesor de 15cm, sin revocar y una cubierta de chapa con una aislación de espuma de polietileno expandido de 1cm doble cara de aluminio marca Isolan®. La fase 2 corresponde a la instancia de incremento de masa de la envolvente. Siendo los muros de tierra con espesores entre 25cm y 33cm, ya con los revoques grueso y finos realizados. A la cubierta se le adiciona una capa de tierra de entre 3cm y 4cm de espesor, aire estanco en botellas de plástico y machimbre. En la tabla 2 se sintetizan las características de la envolvente en cada fase.

La vivienda nace como proyecto autogestionado por los habitantes y construido por ellos mismos sin asesoramiento profesional. Se emplea el sistema de quincha como técnica con una variante de composición de piedra en la mezcla con tierra. Las instalaciones de agua caliente sanitaria son termotanque y se dispone de panel solar para el abastecimiento eléctrico mínimo. Además, se orientó la mayor cantidad de acristalamientos al norte para captar

Tabla 2. Características de la envolvente para las fases constructivas 1 y 2.

ENVOLVENTE		Fase 1	Fase 2
		Delgada	Aumentada
Muro	Técnica	Muro de quincha	
	Espesor	15 cm	25 cm
	Revoques	-	5 cm
Cubierta	Cubierta	Chapa	
	Aislación	Polietileno 1cm	
	Tierra	-	3cm - 4 cm
	Aire estanco	-	En botellas de plástico

la ganancia solar y cerrar los que están orientados hacia el sur. En el exterior, complementa con una huerta orgánica. Estas elecciones de diseño fueron adoptadas por los habitantes de la vivienda compuesta por una familia de 4 miembros.



Fig. 3. Vivienda construida. Arriba, vista exterior de planta alta y planta baja. Abajo, vista interior de la planta baja.

En cuanto a las estrategias bioclimáticas para el acondicionamiento térmico pasivo, se identificó en la vivienda la presencia de un muro trombe y un vivero para la ganancia solar en invierno, mientras que para verano se observaron persianas internas para la protección solar. Los muros construidos de tierra actúan como muro másico.

3. RESULTADOS

3.1. Análisis de la carga térmica en verano, fases 1 y 2

Se presentan a continuación los resultados de carga térmica durante la fase 1 del verano, tomando las Ecuaciones 1 y 2 para determinar la cantidad de calor a extraer o inyectar en los recintos, según el valor de la temperatura interna en comparación con el margen de temperaturas de confort. La Tabla 3 muestra que en la planta baja es necesario extraer una cantidad de calor de $Q_{ex}=19869$ J, mientras que en la planta alta se requieren $Q_{ex}=29057$ J. A pesar de que la planta alta tiene un volumen tres veces menor, presenta más de la mitad del calor acumulado en el aire interior, lo cual debe ser extraído para alcanzar el nivel de confort térmico. Además, en la planta alta se requiere inyectar calor durante la madrugada, siendo $Q_{in}=1239$ J.

En la fase 2, se necesita extraer 63353 J de calor de la planta baja, mientras que la planta alta requiere cerca de la mitad, es decir, $Q_{ex}=32262$ J.

En este caso, el aumento de la masa térmica conduce a un incremento del calor acumulado en el interior, siendo de 34296 J, casi el doble en la planta baja y 12393 J más en la planta alta en la fase 2 respecto de la fase 1. Por lo tanto, el requerimiento energético es mayor cuando se incrementa la masa en la envolvente. En resumen, en la fase 2 se necesita extraer el doble de calor que en la fase 1. Este efecto es aún más pronunciado en la planta alta debido a una mayor exposición a la radiación solar durante los días de verano.

Como se observa en la Figura 4, la única situación en la que se observa la necesidad de agregar calor al interior es en la planta alta durante la fase 1 en el horario de la madrugada. Esto se debe al enfriamiento radiativo nocturno, que ocurre debido a las pérdidas de calor a través de la cubierta con una aislación mínima. En la fase 2, las pérdidas de calor durante la noche se evitan gracias a la masa térmica, que acumula calor durante el día y retrasa su disipación hacia horas de la noche, evitando así la necesidad de calefacción en la vivienda en la madrugada. En la fase 1, la necesidad de extraer el exceso de calor comienza a partir de las 8:00 hs (planta alta) y 9:00 hs (planta baja), y se mantiene hasta la medianoche, alcanzando su pico máximo a las 15:00 hs, en la planta alta y a las 18:00 hs en la planta baja. En la fase 2, con el agregado de masa en la envolvente, se requiere extraer el exceso de calor durante todo el día en ambos recintos, siendo estos excedentes 32262 J para la planta alta y 63353 J para la planta baja.

Como resultado, se observa que el aumento de la masa térmica no se verifica como una estrategia bioclimática eficiente para el acondicionamiento térmico pasivo en la vivienda, para estas características en las condiciones climáticas mencionadas. En todos los casos, se observa un desconfort térmico y se requiere extraer calor durante todo todas las horas del día en la fase 2.

Tabla 3. Calor a extraer o inyectar de los recintos, para verano en las fases 1 y 2.

VERANO				
Fase	F1 - 2020		F2 - 2022	
Recinto	Q_{ex}	Q_{in}	Q_{ex}	Q_{in}
PA	19869	1239	32262	0
PB	29057	0	63353	0

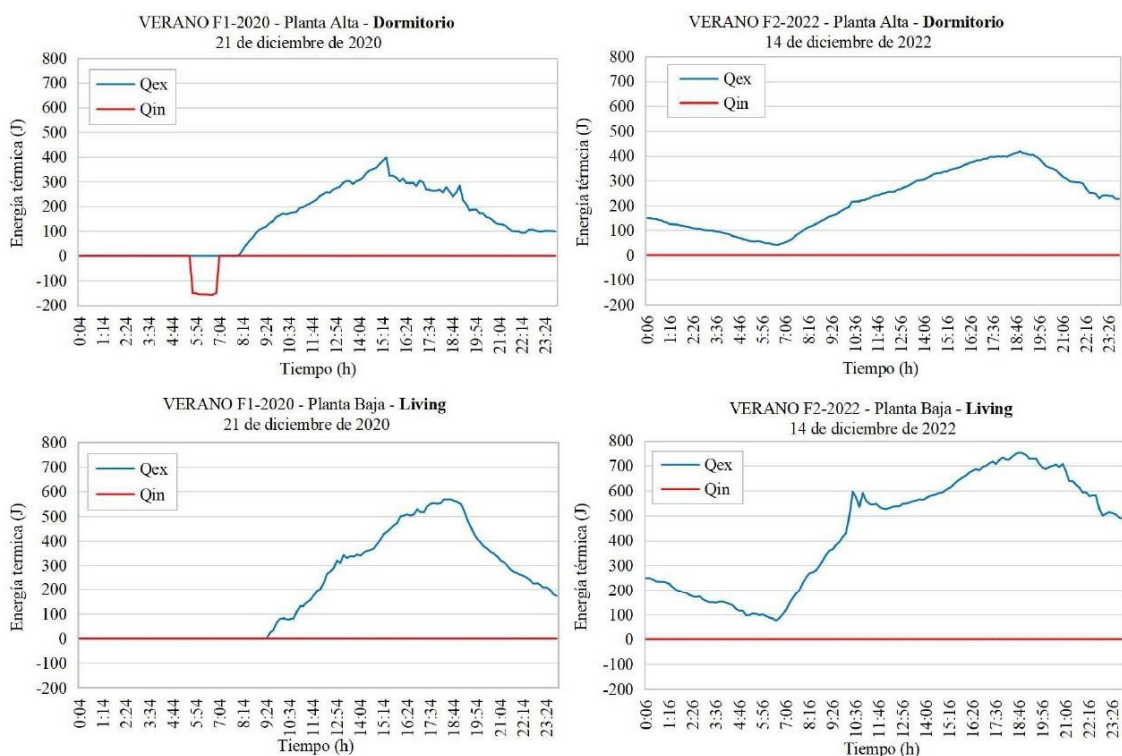


Fig. 4. Variación de la energía térmica a inyectar o extraer de los recintos, para las fases 1 y 2 en estación de verano. Se observa el efecto acumulativo adicional debido al agregado de masa en la envolvente, en la fase 2.

3.2. Análisis de la carga térmica en invierno, fases 1 y 2.

Para la situación de invierno resulta una carga térmica calculada de la misma manera que la situación de verano, mediante las Ecuaciones 1 y 2. En la Tabla 4 se observa que los requerimientos de inyección de energía térmica para mantener el confort dentro de los recintos disminuyeron considerablemente desde la fase 1 a la fase 2. El incremento de masa en la envolvente reduce la cantidad de energía a inyectar en la fase 2 en 27038 J para la planta alta y en 29887 J en la planta baja.

En el caso de la estación de invierno, la estrategia de incremento de masa de la envolvente y la ganancia solar contribuyen a acumular el calor en la masa del muro por la inercia térmica de la tierra de manera de reducir la cantidad de energía requerida para calefaccionar los ambientes interiores.

Tanto en la Tabla 4 como en la Figura 5 se observa una leve cantidad de calor a extraer, 935 J en la planta baja para la fase 1, y 3208 J en la planta alta para la fase 2. Esto se debe a que en los momentos de la tarde se superan las temperaturas de confort térmico siendo aún mayor en la fase 2 con el incremento de la masa de la envolvente. Sin embargo, los valores de calor a extraer son considerados mínimos respecto al calor a inyectar.

En definitiva, el incremento por masa de la envolvente constituye una mejora en la eficiencia energética respecto al comportamiento del flujo de calor tanto en planta baja como planta alta.

De acuerdo con la figura 5, se observa en la planta baja de la fase 1, desde las 11.00 hs hasta las 17.00 hs, y en la planta alta de la fase 2, desde las 9.00 hs. hasta las 21.00 hs, una mayor cantidad de tiempo de horas sin necesidad de inyectar calor y por ende de calefaccionar la vivienda. En todos los casos, por la noche se requiere inyectar calor en el interior del ambiente, siendo el mayor requerimiento de calor a inyectar en la madrugada. Para el

Tabla 4. Calor a extraer o inyectar de los recintos, para invierno en las fases 1 y 2.

INVIERNO				
Fase	F1 - 2020		F2 - 2022	
Recinto	Q _{ex}	Q _{in}	Q _{ex}	Q _{in}
PA	0	55428	3208	28390
PB	935	123617	0	93730

caso de la planta alta en la fase 1 es necesario en todo el periodo calefaccionar el ambiente, esto es debido a la mínima aislación de la envolvente por lo cual pierde el calor acumulado. Por lo contrario, el aumento de la envolvente en la planta alta es la situación que presenta menor requerimiento de energía térmica, esto se debe a la mayor radiación de la cubierta y el aumento por masa permite acumular el calor ganado durante el día sin evacuarlo en la madrugada.

3.3. Balance de la carga térmica y el requerimiento energético entre verano e invierno.

Si se considera el periodo anual, se observa que el incremento de masa térmica produce una mejora en cuanto reduce la energía térmica requerida en invierno en un 32% pero no mejora en verano al aumentarla en un 95%, es decir, que duplica la energía térmica requerida para evacuar el excedente de calor.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el mayor requerimiento energético sucede en la planta baja en la fase 1 con un Q_{in}=123617 J de energía térmica a inyectar, y en la situación más favorable respecto del requerimiento energético es en verano en la planta alta con Q_{ex}= 19869 J. Con el incremento de la masa en

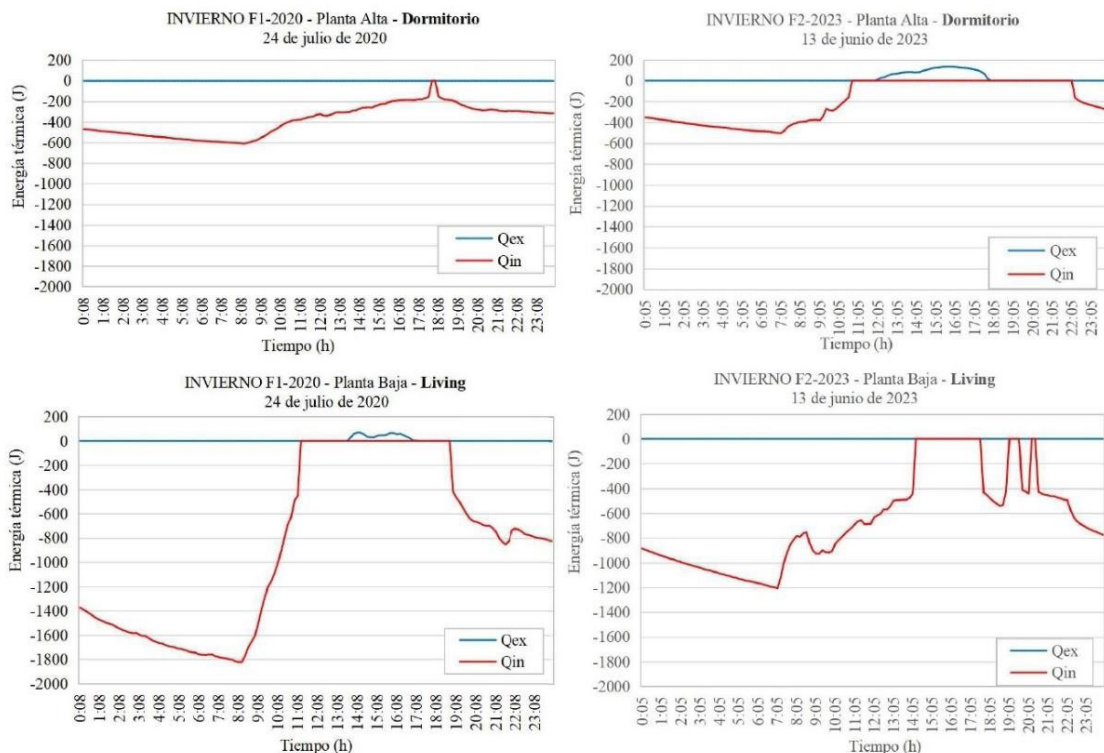


Fig. 5. Variación de la energía térmica a inyectar o extraer de los recintos, para las fases 1 y 2 en estación de verano. Se observa el efecto acumulativo adicional debido al agregado de masa en la envolvente, en la fase 2.

la envolvente (fase 2) los requerimientos energéticos entre verano e invierno se asemejan necesitando 95615 J de energía térmica a extraer en verano y 122119 J de energía térmica a inyectar en invierno. En la fase 1, la diferencia de energía requerida en cada estación es mayor siendo 48925 J la energía térmica a extraer y 179044 J la energía térmica a inyectar. Por lo tanto, para el análisis de un día en verano y un día en invierno la carga térmica requerida es igual en las dos fases, es decir que el incremento de la masa en la envolvente no genera una mejora en tanto que para la fase 1 la suma entre todas los requerimientos energéticos es 230144 J y para la fase 2 es 220942 J.

Sin embargo, si se consideran los grados días de calefacción para Potrerillos, los cuales equivalen a 1929°C día/año (Esteves, et al., 2012) según datos bioclimáticos para la zona V-Frío en Potrerillos es mayor el requerimiento energético para calefaccionar la vivienda.

Para climas con amplia amplitud térmica en verano, la estrategia de muro másico no es la adecuada para refrigerar la vivienda. De esta forma, habría que integrar un conjunto de estrategias bioclimáticas que se adapten a las distintas estaciones del año. En este caso, se deberían complementar con estrategias bioclimáticas que permitan evacuar el excedente de calor en la vivienda en verano, y que permitan a su vez acumular el calor ganado en invierno.

3.4. Análisis del confort térmico.

Según los resultados de los mapas de sensación de confort térmica (Figura 6), se puede observar que en verano el incremento de la masa de tierra de la envolvente no proporcionó una ventaja, sino que por el contrario no presenta confort térmico interior (disminuye el 100%). En invierno, la planta baja no presentaba confort térmico en la fase 1; se logró aumentar en un 13 % y un 4% en la planta alta en la fase 2. Asimismo, el incremento de la masa reduce la oscilación térmica interior tanto en verano como en invierno, como se observa al disminuir la gama de colores en los espacios interiores respecto al exterior. Sin embargo, en verano esta situación no es favorable ya que se mantienen constantes, pero en sensación térmica ligeramente cálida y cálida.

En verano, en la fase 1, el confort térmico interior fue del 29% en la planta alta y del 33% en la planta baja, mientras que en la fase 2 no se alcanzó ningún porcentaje de sensación de confort térmico interior en ninguno de los espacios interiores. Por otro lado, en la fase 1, el confort térmico ocurre durante la noche y en la madrugada. En la planta alta, durante la fase 1, se observa una mayor oscilación del confort térmico, así como un mayor porcentaje de temperaturas máximas y mínimas. Esto se debe a que en la fase 1, con un aislamiento térmico mínimo de la cubierta, sucede una mayor variación térmica en el ambiente interior de la planta alta, dado que la incidencia de radiación solar aumenta durante el día, lo que provoca un mayor aumento de la temperatura y luego en la noche descendiendo por enfriamiento radiativo. En la fase 2, el porcentaje de sensación de calidez se mantiene durante toda la noche y la mañana, alcanzando un 67% en la planta alta y un 83% en la planta baja. Durante la noche en el exterior, se observa que el enfriamiento nocturno es mínimo y solo se produce durante un período de dos horas en la madrugada, lo cual no es suficiente para reducir el calor acumulado en el interior durante el día. Si bien la zona bioclimática corresponde a V-Frío caracterizada por una amplitud térmica diaria que permite el refrescamiento nocturno, en el caso de análisis durante la ola de calor se observa que se reduce a 2 horas la posibilidad del enfriamiento nocturno y que la misma no es suficiente para evacuar el excedente calor, como se

observa por el 100 % de desconfort por calor.

En invierno, en la fase 1, el confort térmico interior fue del 25 % en la planta alta y 0 % en la planta baja. En la fase 2, en la planta alta hubo un 33 % de confort térmico y un 13 % en la planta baja, lo que significa un aumento del 4% en la planta alta y 100% en la planta baja con respecto a la fase 1. Incluso la planta alta mostró un 17% de sensación ligeramente cálida. Siendo además que en el exterior la sensación térmica fue de muy frío durante la mayor parte del día y durante toda la noche.

En este sentido, el incremento de la masa térmica en la envolvente, tanto en los muros como en la cubierta, contribuyó a mantener y acumular el calor en el interior resultando una ventaja. Además,

Tabla 6: Porcentaje de tiempo para cada grado de la escala de sensación térmica PMV en las fases 1 y 2, para verano e

		Fase1	Fase 2	Variación
VERANO				
PA	Confort térmico	29	0	-29
	Ligeramente cálido	25	67	42
	Cálido	46	33	-13
PB	Confort térmico	33	0	-33
	Ligeramente cálido	54	83	29
	Cálido	13	17	4
INVIERNO				
PA	Ligeramente cálido	0	17	6
	Confort térmico	25	33	4
	Ligeramente fresco	29	25	8
	Frío	17	25	-4
	Muy frío	29	0	0
PB	Confort térmico	0	13	-38
	ligeramente fresco	50	71	42
	Frío	29	17	4
	Muy frío	21	0	-21

se observa una mayor oscilación térmica en el interior, llegando a una sensación térmica muy fría en un 29% en las horas de la madrugada. Esta oscilación es mayor en la planta alta, donde se producen mayores infiltraciones y un enfriamiento radiativo nocturno debido a la falta de aislamiento térmico en la cubierta. En la fase 2, el aumento de la masa en la envolvente logra eliminar la sensación muy fría que se experimenta en la fase 1 e incluso alcanzar un mayor porcentaje de sensación ligeramente fría en la planta baja de un 42% de aumento.

En contraste entre las estaciones, la situación desfavorable en verano ocurre durante el día, mientras que en invierno ocurre durante la noche. En la tabla 6 se observan los resultados del porcentaje de tiempo para cada sensación térmica de acuerdo con la escala de PMV de la norma ISO 7730 (1994).

4. DISCUSIÓN

La vivienda se encuentra en el límite de las zonas bioclimática V-Frío y 6-Muy frío, a pesar de esta condición se vio afectada por los episodios de ola de calor en verano llegando a temperaturas de 32°C de máxima. En este escenario, las estrategias bioclimáticas priorizadas para la zona bioambiental mencionada, como lo son la ganancia solar y el muro másico para invierno y el refrescamiento nocturno para verano, se cuestionan para las condiciones del impacto del cambio climático, ya que los eventos de ola de calor impactan sobre las recomendaciones de las estrategias bioclimáticas sugeridas. En este sentido, Flores Larsen et al. (2023) plantean la importancia de una arquitectura que se pueda adaptar a los escenarios futuros que vendrán con olas de calor con temperaturas más calurosas e inviernos menos fríos. También señalan el concepto de resiliencia térmica por parte del usuario. En este sentido se plantea la importancia de la adaptación del usuario para poder ampliar su rango de confort.

Por otro lado, el requerimiento de calefacción sigue siendo mayor que el de refrigeración tanto por los grados días necesarios a calefaccionar en invierno como por la cantidad de energía térmica demandada a inyectar que a extraer según los resultados obtenidos. Por lo cual, surge el interrogante sobre qué arquitectura puede adaptarse al clima y a las condiciones de escenarios futuros de un cambio climático con eventos de olas de calor en zonas bioclimáticas frías. En este sentido, al devenir de las extremas condiciones climáticas replantea una arquitectura flexible y resiliente que pueda brindar una adaptabilidad a las condiciones extremas para alcanzar rangos de confort tanto en verano como en invierno y con el menor requerimiento energético posible.

5. CONCLUSIÓN

De acuerdo con los resultados en el presente trabajo, se concluye que el aumento de masa térmica de la envolvente a partir de incrementar el espesor de la masa de tierra tanto en la cubierta y muro logra un menor requerimiento energético en invierno (reduce un 32% en la fase 2) y duplica para verano (aumenta un 95% en la fase 2). Sin embargo, considerando para las dos estaciones en las dos fases, el incremento de la masa en la envolvente reduce en un 4.5% el requerimiento energético total ($Q=230144$ J en la fase 1, y $Q = 220942$ J en la fase 2).

Así mismo también se alcanzan los niveles de sensación de confort térmico en el interior en invierno (33% en la planta alta y 13% en la planta baja). Sin embargo, en verano se elimina el confort térmico interior al incrementar la masa de tierra en la envolvente.

De esta forma, se confirma que la inercia térmica de tierra contribuye a reducir el requerimiento energético alcanzando mayor grado de confort térmico en invierno, dado que el aumento por masa acumula mayor calor en el interior de la vivienda. Así mis-

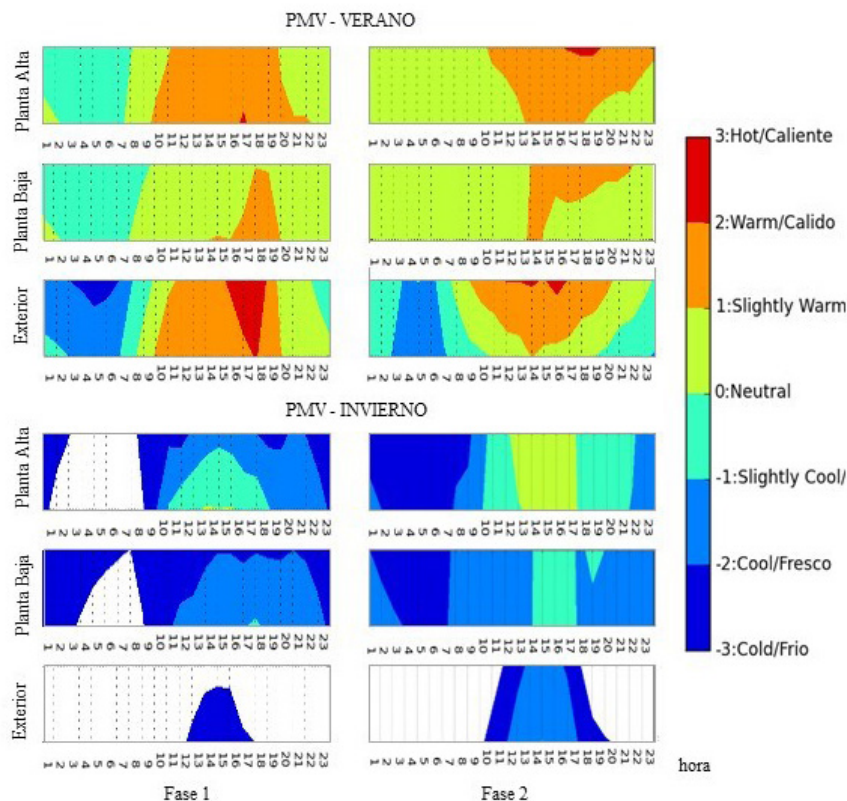


Fig. 6: Confort térmico de verano e invierno comparativo entre las dos fases, obtenidos a partir del software SIMEDIF según los datos de campo.

mo, en el balance anual dado la gran cantidad de grados días fríos que suceden en el sitio de alta montaña, el mayor requerimiento energético de la vivienda sucede por calefacción. Con lo cual, la tecnología de construcción con tierra puede aplicarse como estrategia bioclimática en invierno y no en verano en el cual es necesario disipar y evacuar el excedente de calor. Es necesario entonces integrar otras estrategias bioclimáticas para verano que permitan evacuar el calor excedido en el interior de la vivienda y no acumularlo. La adopción de estas medidas permite contribuir al adecuado uso de las tecnologías constructivas como estrategias bioclimáticas para cada zona bioambiental específica de manera de lograr un confort térmico de las viviendas, reduciendo el consumo energético aún en clima frío de montaña.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo se desarrolló en el marco de la beca doctoral de CONICET. Se les agradece a Valeria Aparicio y a su compañero e hijas por su afectuosa predisposición para contribuir realizar los trabajos de campo. También agradecemos a la Arq. Camila Gea y la Dra. Flores Larsen.

REFERENCIAS

- ASHRAE Standard 55-2017 (2017). Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society 1497 of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta GA.
- Climate. One Building. Org (2019). Repository of free climate data for building performance simulation. Recuperado de: <http://climate.onebuilding.org/>
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., (2005), *Solar Engineering of Thermal Processes*. Third ed., John Wiley and Sons.
- Esteves, A., Mercado, V., Ortiz, J., Baeza, P. (2012). Arquitectura sustentable. Viviendas de montaña para el centro-oeste de Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 16*, 2012. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.
- Filippin, C., Flores Larsen, S.; Marek, L. (2020). Performance térmica energética de un edificio bioclimático en una zona de alta radiación de Argentina. *Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente; Energías Renovables y Medio Ambiente*; 45; 9-2020; 21-31.
- Flores-Larsen, S., Filippín, C, Barea, G. (2018). Impact of climate change on energy use and bioclimatic design of residential buildings in the 21st century in Argentina. *Energy & Buildings*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.015>
- Flores-Larsen, S., Filippín, C, Bre, F. (2023). New Metrics for Thermal Resilience of Passive Buildings During Heat Events. *Energy & Buildings*. En prensa. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4288177> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4288177>.
- Flores-Larsen, S., Filippín, C. (2020). Energy efficiency, thermal resilience, and health during extreme heat events in low-income housing in Argentina. *Energy & Buildings*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110576>
- Fuentes Frexainet V.A (2001). *Arquitectura bioclimática*. Editorial UAM colaboración con Limusa. México.
- Giovino, M.L. (2016). Bilan énergétique, technique de construction et efficacité énergétique : Le Pavillon Suisse à Paris et les Maison en terre dans le sud-est marocain. Tesis de maestría realizada en la Universidad de Paris VII. Inédita. 94p.
- Giovino, M.L., García Villar, G., Dorado, P., Rolón, G. (2022). Desempeño térmico simulado de un edificio construido con tierra alivianada encofrada en Tucumán. Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra. 20. Memorias 20°. Trinidad, Cuba: PROTERRA/Oficina del Conservador. p. 559-569
- Hongn, M., Valdéz, M., Flores Larsen., Gea Salim, C., González, S. (2019). Determinación in situ de la resistencia térmica de muros en edificios históricos: métodos estacionarios y dinámicos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 23, pp 01.45-01.54, 2019. Impreso en la Argentina. ISSN 2314-1433 - Trabajo seleccionado de Actas ASADES
- IRAM 11549. (2002). Aislamiento térmico de edificios. Vocabulario. (p. 28). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Buenos Aires.
- Norma IRAM N° 11601 (2002). Aislamiento térmico de edificios. Método de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario.
- IRAM 11603 (2011). Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina. Instituto de Normalización y Certificación. Argentina.
- ISO 7730 (1994). (standards.iteh.ai) <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/6892a3c7-9ee4-4f23-8b08-90238b9f8b20/iso-7730-1994>
- O' Donovan, A., Murphy, M.D., O'Sullivan, P. D. (2020). Passive control strategies for cooling a nonresidential zero energy office: Simulated comfort resilience now and in the future, *Energy and Buildings*, Volume 231,2021, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110607>.
- Olgay, V. (1963). "Design with Climate." *Princeton University Press*.
- Red PROTIERRA Argentina (2021). Proyecto de ordenanza de Arquitectura y Construcción con tierra. Disponible en:http://redprotierra.com.ar/wp-content/uploads/2021/08/PROYECTO-DE-ORDENANZA-DE-AyCT_julio-2021.pdf
- Roux Gutiérrez, R S.; Gallegos Sánchez, D. P. (2015). CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE, ANÁLISIS DE RETRASO TÉRMICO A BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDOS. Contexto. *Revista de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Nuevo León*, vol. IX, núm. 11, septiembre, 2015, pp. 59-71. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353642518005>
- San Juan, Czajkowski, Rosenfeld, Ferreyro, Gomez, Discoli (2007). Viviendas bioclimáticas de interés social. En libro: "Arquitectura Bioclimática". 181 pág. Editor: Beatriz Garzón. Editorial Nobuko. ISBN: 978-987-584-096-6.
- Secretaría de energía. Disponible en <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/eficiencia-energetica/balance-nacional-de-energia-util/balance-nacional-de-energia-util-residencial>
- Servicio Meteorológico nacional (2020). Informe Especial N°1 Por Ola De Calor -Temporada 2020/2021
- Servicio Meteorológico nacional (2020). Monitoreo de la temperatura en Argentina año 2020

- Servicio Meteorológico nacional (2022). Informe Especial N°1 Por Ola De Frio / Bajas Temperaturas Temporada 2022
- Servicio Meteorológico nacional (2022). Informe Especial N°3 Por Ola De Calor / Altas Temperaturas Temporada 2022-2023
- Servicio Meteorológico nacional (2022). Informe especial n°4 por ola de calor / altas temperaturas Temporada 2022-2023.
- SIMEDIF V2.0. Software de cálculo del comportamiento térmico dinámico de edificios. Disponible en: <http://www.leb.unsa.edu.ar/software/>
- U.S. Department of Energy (2019). *EnergyPlus Weather Data*. Recuperado de: <https://energyplus.net/weather>
- Wieser, M. (2011). Consideraciones bioclimáticas en el diseño arquitectónico: el caso peruano. Lima: Centro de Investigación de la Arquitectura y la Ciudad. PUCP. Recuperado de: <http://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/28699>
- Wieser, M., Onnis, S., & Meli, G. (2020). Desempeño térmico de cerramientos de tierra alivianada. Posibilidades de aplicación en el territorio peruano. *Revista de Arquitectura* (Bogotá), 22(1), 164-174. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2020.2633>