

ADOBE, QUINCHA O FARDOS DE PAJA: DESEMPEÑO TÉRMICO Y CONFORT DE VIVIENDAS EN EL VALLE ANDINO DE USPALLATA, ARGENTINA

Maria Laura Giovino

¹ International Center of Earth Science - ICES, Argentina: ICES- UNCUYO-CNEA, Universidad Nacional de Cuyo – UNCUYO, Comisión Nacional de Energía Atómica-CNEA. Consejo Nacional de investigaciones científicas y técnicas - CONICET, Argentina, arq.mlgiovino@gmail.com

Palabras clave: EnergyPlus, envolventes con tierra, simulación computacional, bioconstrucción

Resumen

La elección de un sistema constructivo en tierra influye en el rendimiento térmico de una vivienda. En la región de Uspallata, se han identificado tres sistemas principales: adobe, quincha y paja encofrada. Cada uno presenta propiedades térmicas particulares, desde la capacidad de acumulación de calor hasta la capacidad de aislamiento térmico por resistencia. Este trabajo examina cómo distintas envolventes de tierra, empleando diferentes sistemas constructivos, afectan al desempeño térmico y confort de una vivienda. Se analizan dos situaciones distintas: un caso de estudio de una vivienda construida con fardos de paja en arcilla y quincha, y en la segunda situación se analiza un modelo computacional simplificado de esta misma vivienda para simular el comportamiento térmico en cuatro escenarios distintos, cada uno correspondiente a un tipo de envolvente (adobe, quincha, fardos de paja encofrada y tierra alivianada encofrada), bajo las mismas condiciones climáticas, empleando el año típico meteorológico (TYM). Se realizaron relevamientos arquitectónicos, monitoreos higrotérmicos, y simulaciones computacionales en EnergyPlus y Simedif. Los monitoreos se realizaron con sensores higrotérmicos HOBO Onset UX 100, registrando datos cada 10 minutos durante 10 días en verano. El análisis mostró que la vivienda construida presenta 40% de confort térmico interior, con una amortiguación de 7°C respecto a las altas temperaturas exteriores durante verano. Las simulaciones mostraron un comportamiento térmico similar entre las distintas envolventes de tierra alivianada encofrada (TAE) y adobe, mientras que la quincha y los fardos de paja tuvieron presentaron comportamientos similares pero distintos a la TAE y al adobe. Se observaron diferencias entre los escenarios basados en TYM y los datos climáticos in situ, destacando que, a pesar del clima frío de alta montaña, el 27% del tiempo la vivienda experimentó disconfort térmico por sobrecalentamiento.

1 INTRODUCCIÓN

La urgencia energética es un tema crítico a nivel mundial. En Argentina, se ha declarado emergencia energética como se expresa a través de la reciente aprobación de la Ley 27742 (2024). El sector residencial representa el 34% consumo energético, principalmente en climatización edilicia el cual constituye el 40% según el Balance Energético de Argentina (Sector Residencial. Acondicionamiento térmico, 2021). En este contexto, la reducción del consumo energético toma mayor pertinencia.

Los conceptos de vivienda pasiva, edificios de energía casi nula (nZEB, por sus siglas en inglés de *net Zero Energy Building*), y eficiencia energética edilicia (EEE) son fundamentales para integrar en el diseño arquitectónico con el fin de reducir el consumo energético en las edificaciones. La incorporación del acondicionamiento térmico pasivo también es clave para disminuir la energía utilizada en climatización. La visión de la EEE se centra en reducir los requerimientos energéticos mediante estrategias eficientes, mientras que la visión nZEB va un paso más allá, integrando tecnologías de energía renovable que puedan suplir el consumo energético (Hernandez; Kenny, 2010). En este contexto, las envolventes de los edificios juegan un papel crucial en la EEE, dado su aporte al acondicionamiento térmico pasivo.

Dadas las diferentes propiedades térmicas de las envolventes según cada sistema constructivo, el flujo de calor entre la vivienda y su entorno se transmite de manera distinta.

VARIABLES como la transmitancia térmica, conductividad térmica, densidad y el calor específico¹ de cada material determinan el flujo de calor y las características de la envolvente (Çengel, 2007). Aquellas envolventes que pueden acumular calor en su masa y, por consiguiente, conducirlo con mayor o menor retardo se conocen como muros mäsicos, mientras que los materiales constructivos que se oponen a la transferencia de calor se analizan a través de la resistencia térmica y se suelen conocer como muros livianos (Ganem; Barea, 2024). Estos autores discuten las ventajas térmicas de las envolventes livianas y mäsicas en sistemas constructivos de ladrillo macizo o en sistemas constructivos de steel frame situados en climas áridos templado y frío de acuerdo con la clasificación climática de Köppen². Sin embargo, esta discusión no se ha extendido a los sistemas constructivos con tierra.

Si bien existe un amplio estado de la cuestión sobre los comportamientos térmicos de envolventes mäsicas y livianas no se ha extendido de igual manera las investigaciones en envolventes a partir de los distintos sistemas constructivos con tierra como adobe, quincha, fardos de paja y tierra alivianada encofrada (TAE) de manera comparativa para los climas fríos de alta montaña como lo es en la región de la cordillera andina. En estos contextos, la aplicación de muros mäsicos como estrategias bioclimáticas contribuye a una gestión eficiente del calor tras acumularse el mismo en la masa térmica de la envolvente, lo que se traduce en un retardo significativo en los cambios de temperatura y en la regulación del clima interior (Giovino; Flores Larsen, 2024).

En los casos de la quincha y el adobe, las envolventes presentan un comportamiento mäsico debido a la inercia térmica de la tierra (Giovino; Dellicompagni, 2023). Las investigaciones de Czajkowski et al. (2022) aportan datos acerca de las propiedades térmicas para los sistemas constructivos de fardos de paja, mientras que Cuitiño et al. (2018, 2020, 2022) contribuyeron con los aportes para los sistemas constructivos de quincha y adobe y Cabrera et al. (2023) y Volhard (2016) contribuyeron acerca de la TAE.

En investigaciones previas se demostró que el incremento de la masa de la envolvente, mediante el aumento de su espesor tanto en muros de quincha y en cubiertas, mejora la eficiencia térmica en invierno, reduciendo los requerimientos energéticos analizado para un caso de estudio en Potrerillos situado en la zona bioambiental V-fría según la clasificación de la norma IRAM 11603 (2012). No obstante, esta misma estrategia resulta contraproducente en verano, provocando sobrecalentamiento interior (Giovino; Dellicompagni, 2023). Por otra parte, en sistemas constructivos de tierra que actúan como aislantes térmicos en lugar de muros mäsicos, como la TAE, estudios de simulación térmica indican desconfort térmico en verano en la zona bioambiental I la situados en Tucumán, analizados a partir de modelos de simulación computacional en EnergyPlus sin considerar un ajuste del modelo con mediciones in situ (Giovino et al., 2022).

Investigaciones en curso, aún no publicadas, incluyen análisis de las características arquitectónicas, ambientales y energéticas de viviendas rurales con muros de tierra en las cuatro zonas bioambientales de la cuenca del Río Mendoza, incluyendo un caso en Uspallata. El análisis del caso de Uspallata, basado en investigaciones previas, evalúa el comportamiento térmico de distintas envolventes de tierra mediante simulación computacional en EnergyPlus. Se considera la importancia de la captación solar a través de la orientación,

¹ - Transmitancia térmica (U): mide la cantidad de calor que se transfiere a través de un elemento constructivo por unidad de superficie y por unidad de diferencia de temperatura entre los dos lados del elemento.

- Conductividad térmica (λ) refiere a la capacidad de un material para conducir el calor; cuanto menor es el valor, mejor aislante es el material.

- Densidad: influye en la capacidad de un material para almacenar energía térmica; materiales con mayor densidad tienden a una mayor capacidad térmica.

- Calor específico (c): es la cantidad de calor que se necesita para aumentar la temperatura de una unidad de masa de un material en un grado Celsius. (Çengel, 2007)

² Según la clasificación climática de Köppen, el clima árido templado y frío se define como BWk, donde B=clima seco, W=desierto (del alemán Wüste) y k=frío (Kalt).

ubicación de las aberturas, y protecciones solares, junto con la técnica constructiva de tierra, como aspectos fundamentales para lograr un acondicionamiento térmico pasivo adecuado según la geolocalización y las condiciones climáticas del sitio, utilizando datos del TYM.

Las metodologías empleadas implican la simulación computacional, que permite evaluar modelos arquitectónicos con distintas resoluciones constructivas, las cuales no podrían ser construidas para evaluar en una misma situación. De esta manera, se realiza un recorte de variables de análisis que permite evaluar de manera comparativa el desempeño térmico de distintas envolventes bajo iguales condiciones climáticas y para un mismo modelo de vivienda. Para poder realizar los ensayos experimentales por los modelos computacionales son necesarios los datos de las propiedades térmicas de los materiales que constituyen las envolventes de quincha, adobe y fardos de paja. Las normas IRAM proporcionan datos sobre las propiedades térmicas de los elementos constructivos, pero no se refieren específicamente a los sistemas constructivos con tierra (Cabrera et al., 2023).

En cuanto a los antecedentes del confort térmico, la norma ASHRAE 55 (2017) define los rangos de confort entre 18 y 22°C y proporciona el índice de predicción del voto medio (PMV) como forma de medirlo. El PMV estima la respuesta promedio de un grupo grande de personas en una escala de sensación térmica que va desde +3 (muy caliente) hasta -3 (muy frío).

El caso de estudio, situado en la cordillera Andina en el valle de Uspallata, se trata de una autoconstrucción que busca contribuir a la sustentabilidad ambiental mediante el uso de materiales locales, como la tierra y la fibra, y la reducción del consumo energético. La elección de los sistemas constructivos en tierra se adopta como una alternativa ecológica y alineada con ideologías como la permacultura. En ciertos casos, estas viviendas construidas con tierra sirven como espacios experimentales que permitan probar tecnologías adaptadas a las necesidades del sitio y para introducir innovaciones que puedan abordar problemas ambientales y habitacionales (Giovino; Guido, 2019).

En función de las características climáticas del sitio, se plantea si las envolventes másicas o livianas son adecuadas como estrategia bioclimática, especialmente en el contexto de envolventes construidas con recursos naturales como la tierra. De esta manera, el objetivo de este trabajo es explorar el comportamiento térmico de cuatro tipos de envolventes de tierra, basadas en los sistemas constructivos de quincha, adobe, fardos de paja y TAE durante la época de verano en un caso de estudio ubicado en una zona de clima VI (muy frío de alta montaña) en el valle de Uspallata, Argentina.

2 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

2.1 Características de la implantación

La vivienda seleccionada como caso de estudio está ubicada en Uspallata, un valle entre altas cumbres que posee las características típicas de los valles andinos de alta montaña como alta radiación solar, heliofanía y gran amplitud térmica. Este valle se encuentra en el departamento de Las Heras y pertenece a la zona bioambiental VI, según la norma IRAM 11603 (2012) como se observa en la figura 1. De acuerdo con esta normativa, la Zona VI: muy fría se caracteriza por tener valores de grados día superiores a 2730 para una temperatura efectiva corregida (TEC) de 22.9°C. Durante el verano, las temperaturas no superan los 12°C, mientras que en invierno no excedan los 4°C y son muy rigurosas, mientras que las presiones parciales de vapor de agua son de 1070 Pa (8 mm Hg), y la zona recibe una alta radiación solar (IRAM 11603). La figura 2 muestra los valores de radiación global sobre plano horizontal y heliofanía efectiva anual.



Figura 1. Mapa de zonas bioclimáticas con ubicación de la vivienda elaborado en base a la clasificación bioambiental de IRAM 11603 (2012) y de acuerdo con la Ley 27.637 (2022)

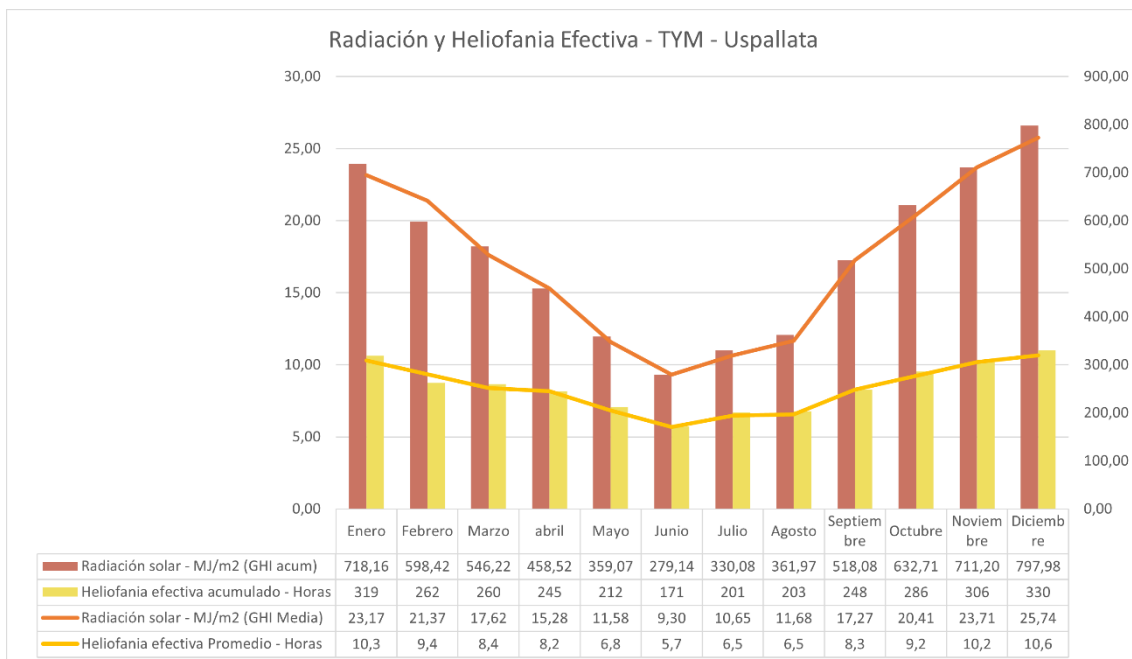


Figura 2: Gráficos de radiación solar y heliofanía efectiva elaborado a partir de datos del SMN (2021)

El TYM describe el clima en Uspallata por su gran amplitud térmica mayor a los 20°C. Las precipitaciones son de 25 mm mientras que la humedad relativa es 50% lo que lo hace una zona de valle con mayor humedad que las zonas frías de sus alrededores. En esta zona, las temperaturas críticas suceden con las nevadas en invierno. Los valores de radiación son tres veces mayores para verano que para invierno de acuerdo con los registros del SMN (2021) como se observa en la figura 2. De acuerdo con Esteves y Gelardi (2008), el requerimiento anual de calefacción a base de 18 °C para Uspallata es de 2648 °C día/año³.

En cuanto a la implantación del caso de estudio, la vivienda se sitúa en San Alberto, a 8.2km de la Villa de Uspallata, con una latitud de -32,529117, longitud de -69,337668 y altitud de 1.995,50 (figura 3). De acuerdo con dicha ubicación, en el diagrama de latitud y altitud de la norma IRAM 11603 (2012), el caso de estudio se sitúa en la zona bioambiental VI-muy fría.

³ grados-día de calefacción (GDC) representan la diferencia entre una temperatura interior (denominada temperatura base) y la temperatura exterior, sumadas para un período de tiempo determinado (mes o año) y dan idea de la rigurosidad (Esteves; Gelardi, 2008)

Se trata de un terreno aislado que no cuenta con acceso a infraestructura como lo son el tendido eléctrico, provisión de agua, gas, entre otros servicios. El proceso de ocupación del territorio vino a priori de las condiciones de infraestructura territorial para su ocupación.

2.2 Análisis de las características de la vivienda

La vivienda se caracteriza por emplear dos sistemas constructivos: la quincha y los fardos de paja. Combinan un sistema de quincha para los muros del Noreste, Norte y Oeste mientras que los muros al Sur emplean un sistema de fardos de paja encofrada y arcilla líquida.

El diseño arquitectónico se resuelve en dos plantas de la cual una se encuentra semienterrada. En planta alta se sitúan el estar-comedor y la cocina integrados en un solo espacio y un baño, mientras que en la planta baja semienterrada se hallan los dos dormitorios y un espacio de depósito de alimentos. La forma geométrica de la planta se basa en un prisma de 12 lados la cual surge a partir de la composición espacial volumétrica y diseño estructural que responden a los principios de geometría sagrada y al árbol de la vida Huarpe de acuerdo con los testimonios de los habitantes locales (testimonios en entrevista de campo, 2021). La estructura se compone de columnas de madera dispuestas en formato geométrico de 12 lados. Las aberturas se orientan desde el noreste al noroeste con vidrios simples reduciendo el tamaño de abertura al oeste y al sureste. Los revoques se realizaron con mezclas de tierra del lugar, en un porcentaje de engrudo, arena gruesa, arena fina. Para los revoques finos se emplea además cera de abeja.

La vivienda no cuenta con acceso a red eléctrica, gas, ni agua. En este caso se ejemplifica cómo en una situación de desvinculación a la infraestructura energética, los requerimientos son satisfechos por el uso de distintas fuentes de energías renovables. El suministro de energía eléctrica de la vivienda se genera mediante paneles fotovoltaicos y un sistema *off grid* para el autoconsumo de las necesidades eléctricas. El mayor consumo energético de la vivienda se debe al consumo de la calefacción en consideración de la implantación en clima muy frío de montaña. Para calefaccionar la vivienda se utiliza una estufa rusa (suministro por biomasa). El agua caliente sanitaria se satisface con un termotanque solar. La iluminación y los artefactos eléctricos se abastecen con la electricidad generada con paneles solares fotovoltaicos. La vivienda no cuenta con sistemas de refrigeración activos, sino que se emplean estrategias pasivas como protección solar como persianas las cuales son gestionadas por los usuarios.



Figura 3. Vistas de la vivienda. De izquierda a derecha: fachada Este, Oeste, Norte, Sur (imágenes registradas en 2020)

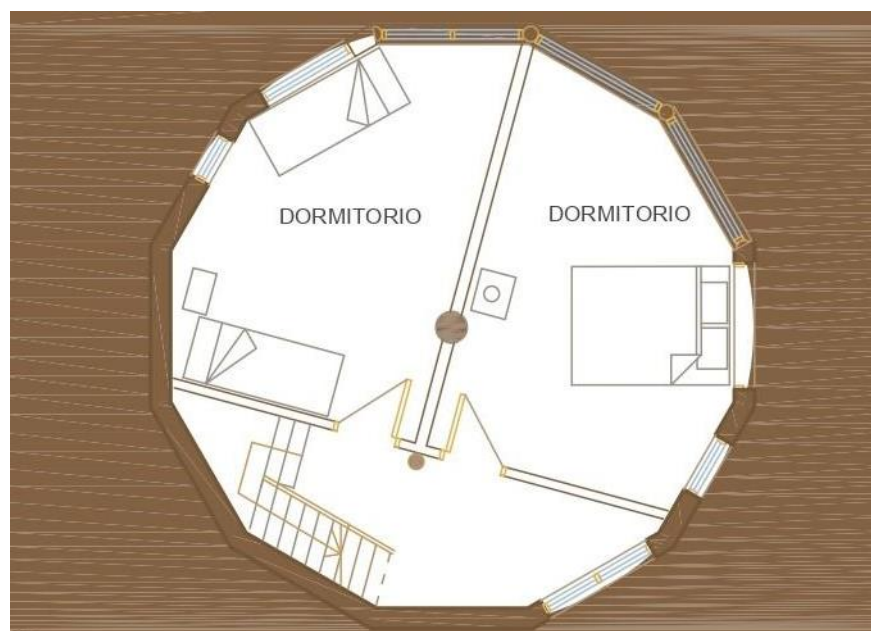
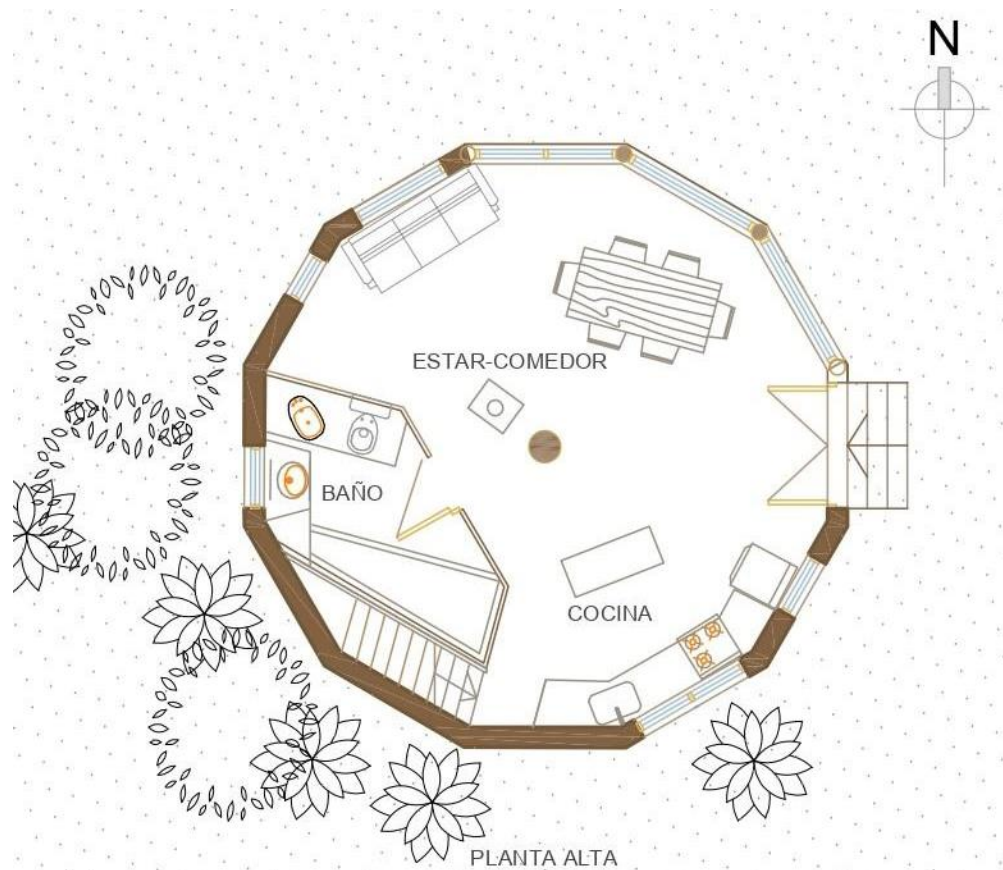


Figura 4. Planta de la vivienda

2.3 Características y propiedades térmicas de las envolventes con distintos sistemas constructivos: adobe, quincha, fardos de paja encofrada

En la tabla 1 se presentan los datos de las propiedades térmicas de la componente de la envolvente de acuerdo a datos recopilados en Giovino et al. (2022). Si bien la técnica del sistema constructivo empleado por los autoconstructores de la vivienda se conoce localmente como fardos de paja encofrada, estos dispusieron de la variante de embeber los fardos en una barbotina de arcilla y arena fina con lo cual se consideraron para la toma de datos de

propiedades térmicas de la envolvente los valores de la TAE, la cual consiste en fibras en una mezcla símil barbotina de tierra y arcillas y cuyos datos térmicos se tomaron de Volhard (2016) y Giovino et al. (2022). Los datos de las propiedades térmicas de los muros de adobe y quincha se consideraron de las investigaciones de Cuitiño et al. (2018, 2022).

Tabla 1. Propiedades de las técnicas constructivas

Técnica constructiva	Muro de adobe	Muro de quincha	Fardos de paja	TAE	Revoque de tierra
Espesor (m)	0.25	0.25	0.25	0.25	0.015
Conductividad (W/m·K)	0.46	0.25	0.08	0.17	0.50
Densidad (kg/m ³)	1500	1180	200	600	1500
Calor específico (J/kg·K)	836	1090	1600	1050	900
Referencia	Cuitiño et al. 2018; 2022		Czajkowski, et al. 2022	Volhard, 2016	Giovino et al. 2022

3 MATERIALES Y MÉTODOS

Se emplea la estrategia de casos de estudio cuyo análisis combina métodos cuantitativos y cualitativos. Se utilizarán relevamientos de campo y entrevistas para confeccionar la geometría de la vivienda y caracterizar los elementos constructivos relevados. Para obtener datos de las propiedades térmicas de los sistemas constructivos se recurre a la búsqueda bibliográfica del estado del arte. El encuadre cuantitativo en distintas fases que incluyen un monitoreo higrotérmico de la vivienda, el cálculo de confort térmico a través del software SIMEDIF y los ensayos del comportamiento térmico para los distintos escenarios de envolventes según los sistemas constructivos de TAE, adobe y quincha para el cual se emplea el software EnergyPlus V23.1 que permite realizar simulaciones computacionales. Los datos para la simulación se tomaron además de los datos recopilados durante la investigación previa.

Se emplearon instrumentos de medición con sensores de temperatura y humedad HOBO Onset Modelo UX100-003. Los sensores higrotérmicos registran en un rango de -20 a +70°C; de 15 a 95% HR, tienen una exactitud de +/- 0,21°C (de 0 a 50°C); +/- 3,5% HR (de 25% a 85%) y una resolución de 0,024°C / 0,07% HR (a 25°C), (Giovino; Flores Larsen, 2024). Se colocaron 3 sensores, uno en la planta alta, otro en la planta baja y un tercer sensor en el exterior bajo el alero sur. Los registros se realizaron en agosto del año 2021 y enero del año 2022.

La recopilación de datos climáticos para el TYM se realizó a través de la búsqueda sistemática de datos meteorológicos por modelos satelitales a través de archivos climáticos como Meteororm V7 y base de datos de Energy Plus, mientras que los datos climáticos actuales se tomaron de los informes del SMN (2021).

3.1 Ensayos a través de EnergyPlus y Simedif

Se emplea el software Energyplus para realizar una simulación de la vivienda para el TYM de Uspallata. Para realizar esta simulación se requieren ciertos datos: las características geométricas para modelar en 3D utilizando SketchUp, las propiedades térmicas y dimensiones de los componentes constructivos, las condiciones meteorológicas y las cargas internas basadas en horarios, uso, ocupación e infiltraciones. Se tomaron los datos de las propiedades de la geometría de la vivienda y de las propiedades térmicas de las envolventes de las distintas técnicas constructivas, adobe, quincha y TAE teniendo en cuenta las características previamente descritas. Se elaboró el modelo y la caracterización geométrica

según las características constructivas del edificio. Se definieron tres zonas térmicas en función de la geometría y el uso del edificio: el estar-comedor y cocina integrada, el baño, y la planta baja con los dormitorios. Para el presente artículo se analiza solo la zona térmica 1 correspondiente al estar-comedor-cocina. Para la simulación, el edificio se ubicó el caso de estudio en las coordenadas precisas de la implantación.

Las propiedades térmicas de los materiales para la simulación térmica se obtuvieron de los datos mencionados en la tabla 1 los cuales que presentan los valores adoptados de la literatura y de la IRAM 11601 (2002). Esta información se usó para configurar los parámetros en el software, asignando los materiales correspondientes a cada superficie del modelo. En la figura 6 se visualiza la geometría del modelo realizado en EnergyPlus para la simulación del comportamiento térmico de cada sistema constructivo.

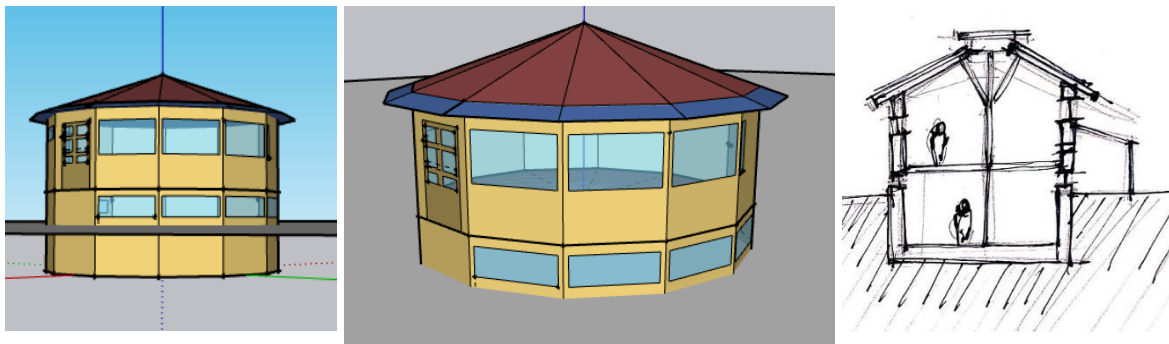


Figura 6. Modelado 3D del edificio y la asignación de las características de los cerramientos y esquema de corte

El nivel de confort térmico de la vivienda se estimó a partir de los datos de monitoreo de la temperatura y humedad relativa registradas en los ambientes interiores. Para esto, se utilizó el módulo independiente del software SIMEDIF V2.0, basado en la norma ASHRAE 55 (2020), que estima la sensación de confort mediante el PMV y el porcentaje de personas insatisfechas (PPD) el cual considera el índice de arropamiento, la tasa metabólica, la velocidad del aire, la temperatura operativa y la humedad.

Se utilizó un índice de arropamiento de 1 Clo para invierno, aunque en las viviendas de las zonas andinas se suelen usar más prendas de abrigo. El PMV se predice en una escala de 7 rangos: muy frío ($PMV < -2.5$), frío ($-2.5 < PMV < -1.5$), fresco ($-1.5 < PMV < -0.5$), neutral ($0.5 < PMV < +0.5$), cálido ($+0.5 < PMV < +1.5$), caluroso ($+1.5 < PMV < +2.5$), muy caluroso ($PMV > +2.5$). La zona de confort se define como aquella en la que el 80% de las personas en actividad sedentaria o ligera encuentran el ambiente térmicamente aceptable. El software presenta los resultados de manera gráfica y en archivos de texto plano, usando las condiciones de cálculo definidas por la ASHRAE 55 (índice de arropamiento: 0.5-1 Clo; tasa metabólica: 1.3 MET; velocidad mínima del aire: 0.1 m/s) (Giovino; Flores Larsen, 2024).

3.2 Limitación y recortes del modelo de simulación computacional para este análisis

A fin de verificar la hipótesis acerca del desempeño térmico de las envolventes de tierra resueltas con distintos sistemas constructivos, los objetivos se han planteado realizando un recorte de análisis para tal fin, es decir, que la simulación térmica se reduce en un modelo de simulación simplificado que permita a analizar solo a las variables que corresponde a tal fin. Por lo cual se limitó el modelo a un recorte de la zona térmica de estudio analizando solo la planta alta y despreciando la influencia del piso semienterrado. Asimismo, se despreció el ajuste del modelo con los datos del monitoreo higrotérmico y se emplearon los datos de las en base al obtenido por modelos satelitales que permite simular las características climáticas del sitio idénticas para las cuatro envolventes en análisis. Se respetaron las características de la geometría de la vivienda y se emplearon los datos de las propiedades térmicas de los materiales de acuerdo al estado del arte siendo una aproximación a las características constructivas de las envolventes de la vivienda construida. Por otra parte, se recortan las

variables correspondientes a uso y gestión de los usuarios, que se reflejan en horarios de renovación de aire, entre otras variables, como también se recortan las variables de convección sobre superficies de los paramentos, flujos de aire por ventilación, ganancias internas por personas o usos de climatización activa ya sea para refrigeración o calefacción, también influenciada por el uso y gestión de los usuarios. Por tal, cabe aclarar que, al descartar dichas variables para poder realizar el análisis, el modelo no se ajusta a las características que corresponden al caso de estudio en sí relevado, sino que es una abstracción de la misma a modo de realizar un análisis sobre un modelo simplificado según la hipótesis inicial que permita evaluar el comportamiento de distintas envolventes construidas con tierra para iguales condiciones para los cuatro escenarios de simulación.

Se realizó entonces la simulación sin ocupación para evaluar solo el desempeño térmico de las cuatro técnicas constructivas de la envolvente. No se adoptaron tampoco renovación de aire por hora para verano ni invierno. No se consideró ventilación nocturna ni cruzada por lo cual se considera que las ventanas exteriores se mantuvieron cerradas (factor multiplicador = 0).

En cuanto las influencias de la planta baja para la simulación de la zona térmica de la planta alta, se consideró una situación del entrepiso de madera realizado con machimbre y sobre piso de tierra tal como se observa en la figura 7. El trabajo se enmarca en las investigaciones realizadas por Giovino y Guido (2019), Giovino et al. (2022,2023) y Giovino y Flores Larsen (2024).

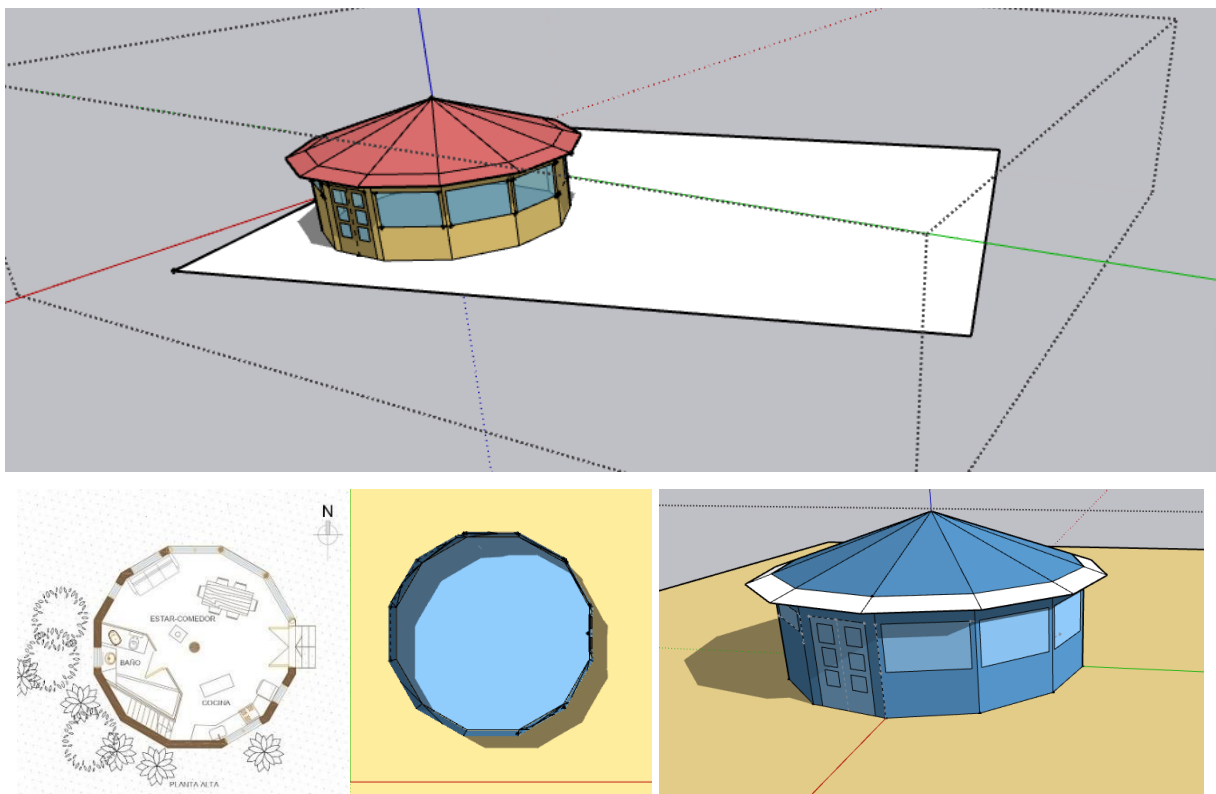


Figura 7. Recorte para el análisis a partir de selección de zona térmica correspondiente a la planta alta cuya función es del estar-comedor-cocina elaborado en EnergyPlus.

4 RESULTADOS

4.1 Desempeño térmico comparados entre distintas envolventes

En el periodo de monitoreo higrotérmico registrado en verano para el periodo 10 días, del 12 al 22 de enero de 2022, se observan un comportamiento constante y similar durante toda la

serie como se presenta en la figura 8a. Se detecta una amplitud térmica diaria aproximada a los 20°C. La temperatura máxima registrada en la serie llega a 36°C el día 3, lo cual no suele ser usual para el clima de Uspallata. La temperatura mínima de la serie se registró en 7°C el día 7.

Por su parte, los resultados de las temperaturas del aire interior se muestran por encima de los niveles de confort durante los horarios de la tarde durante 9 días de la serie de 10, siendo entonces solo un día el que no registró desconfort térmico en el día que se detectó las temperaturas más bajas de la serie. La temperatura máxima interior detectada llega a los 29°C y la temperatura mínima interior detectada llega a 13°C.

Se observa entonces que entre la temperatura máxima exterior registrada y la temperatura interior existe 7°C de amortiguación de temperatura respecto a la situación más calurosa de la serie, mientras que respecto a la temperatura mínima exterior registrada existe 6°C de amortiguación con la temperatura interior.

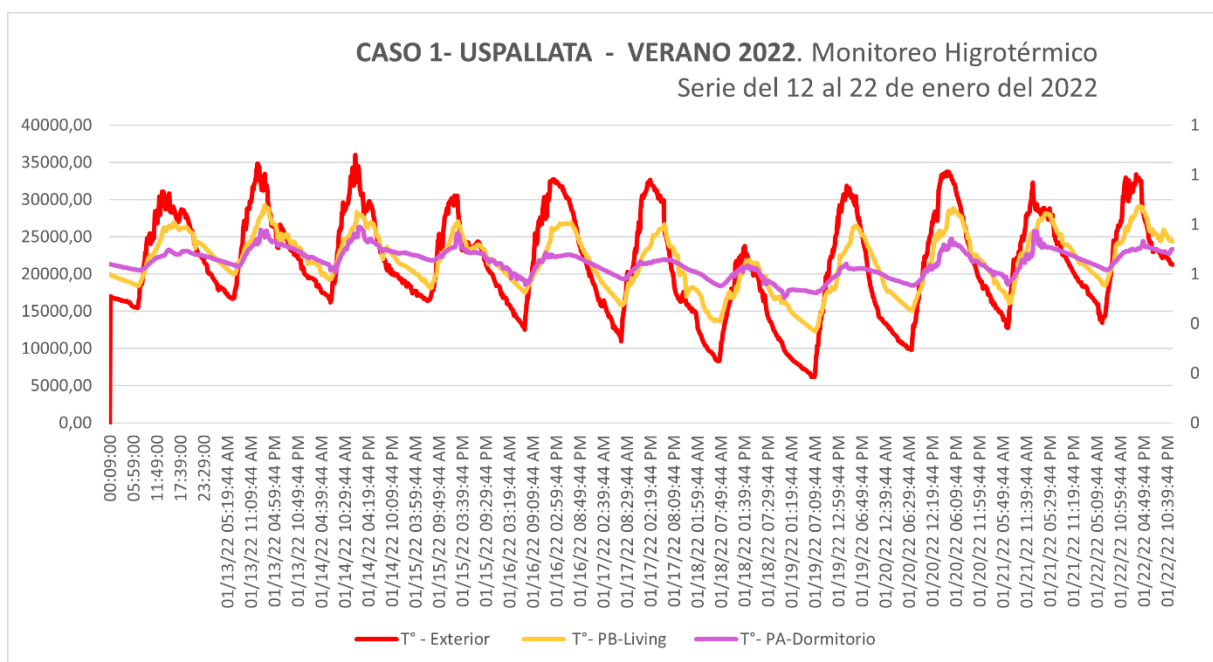


Figura 8. Desempeño térmico del espacio de análisis para una zona térmica, el estar-comedor-cocina elaborado a partir del registro de los datos de temperatura y humedad de la vivienda construida

Por otra parte, los resultados de la simulación para el modelo sin ajustar con los monitoreos higrotérmicos y simuladas para el TYM, muestran un comportamiento diferente al observado en las temperaturas registradas. Las simulaciones realizadas con distintos tipos de envolventes, como adobe, quincha, fardos de paja y TAE, evidencian un sobrecalentamiento de la temperatura interior en comparación con la temperatura exterior del TYM. En este caso, el modelo de análisis presenta una limitación, ya que no se consideran movimientos convectivos en las superficies, flujo de aire, entre otras características cruciales para ajustar el modelo simulado con la realidad. Sin embargo, se considera el modelo limitado a fin de analizar los distintos comportamientos de los materiales de la envolvente para cada sistema constructivo bajo las mismas condiciones y para una misma tipología.

De acuerdo a las simulaciones del desempeño térmico para el modelo simulado resulta la envolvente con la técnica de quincha la que presenta comportamientos térmicos más elevados que el adobe, la TAE y los fardos de paja. La envolvente construida con TAE es la que demuestra menores temperaturas y un comportamiento muy similar al de la envolvente de adobe. Un comportamiento particular que se observa es la disminución de la oscilación entre las temperaturas máximas y mínimas interiores, con una variación de aproximadamente 2°C.

A partir de las propiedades de las envolventes, descritas en la tabla 1, confeccionada según las investigaciones de Czajkowski et al. (2022), Cuitiño et al. (2018, 2022), Volhard (2016) y Giovino et al. (2022), se observa que, a pesar de que la quincha tiene una conductividad térmica intermedia ($\lambda = 0.25 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) entre la conductividad térmica del adobe ($\lambda = 0.46 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) y la de la TAE ($\lambda = 0.17 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), posee una mayor capacidad de acumular calor debido a sus altos valores de calor específico ($C_p = 1090 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$) y densidad ($\rho = 1180 \text{ kg/m}^3$). Aunque la TAE tiene valores de calor específico similares a la quincha, su densidad y conductividad térmica son menores, lo cual contrasta con el adobe, que presenta una densidad más alta ($C_p = 1500 \text{ kg/m}^3$) y un calor específico menor ($836 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$). En cuanto a los fardos de paja, si bien su calor específico es aún mayor al valor de la quincha ($C_p = 1600 \text{ kg/m}^3$) su conductividad térmica es sumamente menor que la tae, la quincha y el adobe ($\lambda = 0.08 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) y su densidad también es menor ($\rho = 200 \text{ kg/m}^3$)

De este modo, se deduce del comportamiento térmico simulado de las distintas envolventes (figura 9) y de acuerdo con las propiedades de los materiales mencionados, que la envolvente en quincha tiene una mayor capacidad para acumular y transmitir el calor, lo que justifica las temperaturas más altas alcanzadas en los ensayos simulados. Esta propiedad puede ser una ventaja durante el invierno en zonas de alta montaña con alta radiación solar y $2460 \text{ }^\circ\text{G}$ (Esteves et al, 2008) pero en verano podría provocar sobrecalentamiento en el interior si no se combina con otras estrategias de acondicionamiento térmico pasivo y bioclimáticas.

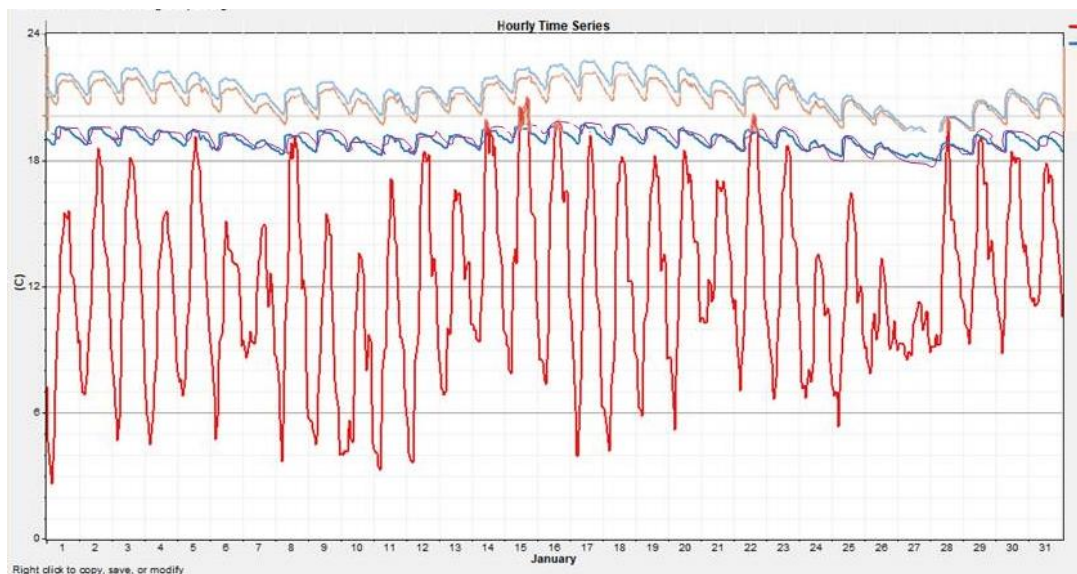


Figura 9. Desempeño térmico del espacio de análisis para una zona térmica, el estar-comedor-cocina simulado para cada tipo de envolvente según cada sistema constructivo y para el TYM.

4.2 Confort térmico de temperaturas registradas para vivienda construida

El rango de temperaturas de confort en el interior está definido entre el rango 18°C y 22°C de acuerdo con PMV según la norma ASHRAE 55. En la figura 10 se se observa los resultados de la sensación térmica (PMV) por medio del código de color en porcentaje de disconfort a confort. Resulta un 0% (0 h) de disconfort térmico con valores correspondiente al rango muy caliente ($\text{PMV} > 2.5$), un 0% (0 h) cálida. ($1.5 < \text{PMV} < 2.5$), un 26% (70 h) con sensación ligeramente cálida ($0.5 < \text{PMV} < 1.5$), es decir, que un 26% de la vivienda experimenta temperaturas de disconfort térmico por sobrecalentamiento y logra amortizar las altas temperaturas exteriores. La vivienda estuvo un 40% (107 h) en sensación de confort térmico ($-0.5 < \text{PMV} < 0.5$), mientras que un 27% (72 h) con sensación ligeramente frío ($-1.5 < \text{PMV} < -0.5$), un 4% (13 h) con sensación fresco ($-2.5 < \text{PMV} < -1.5$) y finalmente no se detectaron valores de PMV por encima del -2.5 correspondiente a temperaturas muy frías ($\text{PMV} < -2.5 = 0\%$ del total)

Aunque la temperatura interior logra estabilizarse en comparación con las fluctuaciones térmicas exteriores, las oscilaciones de la temperatura interior varían alrededor de alrededor de 10°C mientras que las oscilaciones en el exterior alcanzan aproximadamente 20°C. Sin embargo, la distribución del confort térmico en el espacio de análisis, la planta alta donde se sitúa el estar-comedor, no es uniforme a lo largo del día. Se observa que con temperaturas ligeramente cálidas durante el día prevalecen condiciones de confort térmico durante la noche. En los días en que se alcanza un confort térmico durante el día, la temperatura interior tiende a descender durante la noche, predominando valores de PMV ligeramente fríos. Con lo cual dichos resultados sugieren que el espacio analizado podría optimizarse para lograr mantener el confort térmico.

Dichos resultados se obtuvieron de acuerdo con las condiciones de cálculo según los valores de temperatura y humedad relativa registrados en el monitoreo y los valores de índice de arropamiento en verano: 0,5 clo, tasa metabólica: 1,3 met, y velocidad del aire: 0,3 m/s.

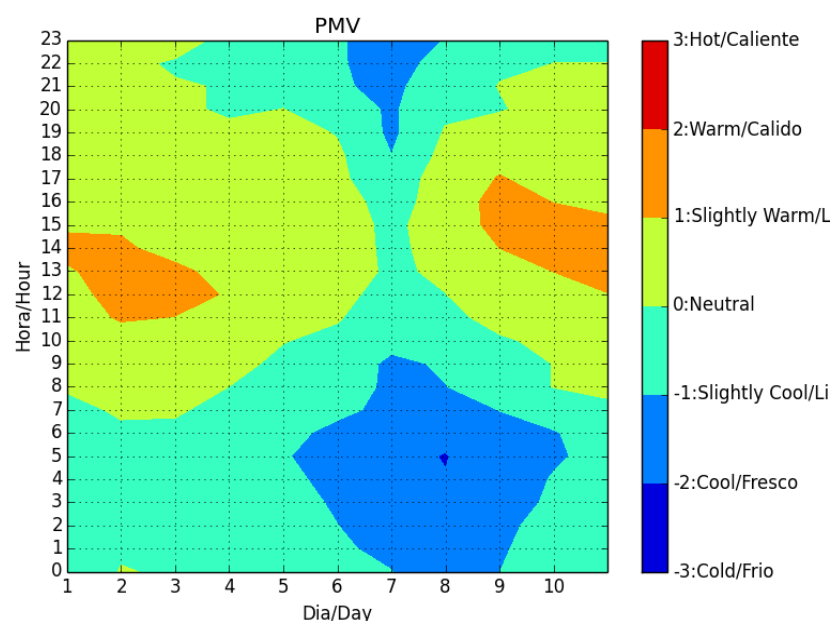


Figura 10. Diagrama de confort del espacio de análisis para una zona térmica, el estar-comedor-cocina elaborado a partir de los datos registrados por monitoreo y procesados con SIMEDIF v2.0

5 CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

El trabajo busca identificar los interrogantes que surgen del análisis realizado. En primer lugar, se observa la diferencia de metodologías de análisis respecto al uso del año típico meteorológico frente a los registros de datos climáticos de las estaciones meteorológicas y los datos de temperatura registrados in situ. Esto pone en evidencia la necesidad de cuestionar las temperaturas de diseño utilizadas para establecer estrategias energéticas pasivas en la vivienda que permitan un adecuado acondicionamiento térmico. En este sentido, Coronato et al. (2024), Barea et al. (2022, 2023) proponen verificar las estrategias bioclimáticas considerando escenarios climáticos futuros a partir del TYM futuro. Este puede establecerse para distintos escenarios, tanto a corto como a largo plazo, y ya se están llevando a cabo investigaciones al respecto. Por su parte, Flores Larsen et al. (2022, 2023) propone un estudio de metodologías para detectar olas de calor y para estudiar la resiliencia térmica edilicia, es decir, la capacidad de recuperación ante eventos climáticos.

Por otro lado, se consideró un caso de estudio en una zona bioambiental VI-muy fría con clima de alta montaña que aún en este contexto, se observó que la vivienda presentaba temperaturas elevadas, mostrando un desconfort térmico en un 60%. Los sobrecalentamientos son leves y suceden durante el día en las situaciones de confort térmico nocturno. En este sentido, coinciden las investigaciones previas de Giovino y Dellicompagni (2023), donde se

demonstró que el incremento de la masa de tierra en las envolventes con quincha para el caso de una vivienda situada en zonas frías con la estrategia de total apertura al norte con vidrio simple se constituye como ventaja térmica en invierno, pero no en verano por los sobrecalentamientos del aire interior.

El modelo de simulación simplificado, aunque no se correlacionó con el caso real de la vivienda construida en este análisis, ha demostrado leves diferencias en el comportamiento térmico de la envolvente. La quincha resulta la técnica que mayores valores de la temperatura alcanza en el modelo simulado lo cual simula un sobrecalentamiento en el interior de la vivienda y por ende mayor discomfort térmico en verano. La TAE, con una menor conductividad térmica y calor específico, aproximadamente tres veces menor que el adobe, presentó menos temperaturas. Mientras que las envolventes de adobe y quincha tuvieron un comportamiento similar, acumulando el calor en la masa de la envolvente. Todas las envolventes simuladas presentaron sobrecalentamientos respecto de las temperaturas del TYM dado que se restringieron las variables de ventilación, renovación de aire. En contraste, el comportamiento de la TAE, similar al de un aislante térmico y no a un muro macizo. Las ventanas al norte captan mayor radiación solar.

En cuanto al confort térmico utilizado para los resultados del monitoreo higrotérmico para el caso de la vivienda construida se observa un 40% de satisfacción por lo cual podrían aún realizarse mejoras en la vivienda.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE 55 (2017). Thermal environmental conditions for human occupancy. USA: American National Standards Institute (ANSI). American Society 1497 of heating, refrigerating and air conditioning engineers. Atlanta GA.

Barea, G.; Mercado, M. V.; Filippín, C.; Monteoliva, J. M.; Villalba, A. (2022). New paradigms in bioclimatic design toward climatic change in arid environments. *Energy and Building*, 266, 112100.

Barea-Paci, G.; Ganem, C.; Molina, M.C.; Mateo, P. (2023). Efectividad a futuro de las estrategias de diseño pasivas en viviendas. *Revista Hábitat Sustentable* Vol. 13, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / p. 30-41.

Cabrera, S.; Guillarducci, A.; González, D.; Suárez, M. (2023). Evaluación del coeficiente de conductividad y transmitancia térmica de elementos constructivos de tierra, *Revista Hábitat Sustentable* 10 (1), 8 -19. <https://doi.org/10.22320/07190700.2023.13.01.01>

Çengel, Y. A. (2007). *Heat and mass transfer: Fundamentals & Applications*. McGraw-Hill Education

Coronato, T.; Zaninelli, P. G.; Abalone, R. M.; Carril, A. F. (2024). Climate change projections for building energy simulation studies: a CORDEX-based methodological approach to manage uncertainties; *Springer; Climatic Change*; 177; 3; 2-2024; 1-22

Cuitiño G.; Esteves A.; Marín L; Bertini R. (2018). Salón de usos múltiples con tecnología de quincha en zona de montaña. Análisis térmico de su comportamiento. *Acta de la XXXIX Reunión de Trabajo de ASADES, Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*, 4, 95-103.

Cuitiño G.; Esteves A.; Najar, L. (2022). Respuesta de los muros de quincha al riesgo de condensación. *Revista Hábitat Sustentable* 12 (2). ISSN 0719 - 0700 / Págs. 84 - 97. Recuperado de: <https://doi.org/10.22320/07190700.2022.12.02.06>

Cuitiño, G.; Rotondaro, R.; Esteves, A. (2020). Análisis comparativo de aspectos térmicos y resistencias mecánicas de los materiales y los elementos de la construcción con tierra. *Revista de Arquitectura*, 22 (1), 138 –151.

Czajkowski, L.; Kocewicz, R.; Weres, J.; Olek, W. (2022). Estimation of thermal properties of straw-based insulating panels. *Materials (Basel)* 15(3):1073.

Esteves, A.; Gelardi, D. (2008) Método para el cálculo de grados día de cualquier temperatura base y cualquier localidad. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* (12). ISSN 0329-5184

Flores Larsen, S.; Bre, F.; Hong, M., (2022). A performance-based method to detect and characterize heatwaves for building resilience analysis; Pergamon-Elsevier Science Ltd; Renewable & Sustainable Energy Reviews; 167.

Flores Larsen, S.; Filippín, C.; Bre, F. (2023). New Metrics for Thermal Resilience of Passive Buildings During Heat Events. <https://ssrn.com/abstract=4288177> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4288177>

Ganem, C.; Barea, G. (2024). Muros masicos o livianos {Material de taller} Mendoza. Taller de soluciones sostenibles para la eficiencia energética en el hábitat en distintas escalas de intervención. Jornadas internacionales de construcción sostenible de la visión a la acción en la economía circular.

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

Giovino, M. L.; Dellicompagni, P. (2023). Desempeño higrotérmico de una vivienda de quincha en alta montaña andina durante eventos climáticos y modificación de su envolvente. Revista ERMA, Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 51. pp. 47-56. ISSN 0328-932X. IS

Giovino, M. L.; Flores Larsen, S. (2024). Desempeño térmico de una vivienda de arquitectura de tierra en la montaña andina. PENSUM, 10(12), 126–146. <https://doi.org/10.59047/2469.0724.v10.n12.41117>

Giovino, M. L.; Guido, L. (2019). La construcción con tierra como tecnología social: casos en Argentina. Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra, 19 (Oaxaca de Juárez, México). Memorias. San Salvador, El Salvador: FUNDASAL / PROTERRA. p. 718-732. Disponible en: <https://redeterrabrasil.net.br/wp-content/uploads/2020/10/19-SIACOT-Mexico-2019.pdf>

Hernandez, P.; Kenny, P. (2010). From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB). Energy and Building, 42.

IRAM 11601 (2002). Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario. Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

IRAM 11603 (2012). Acondicionamiento térmico de edificios Clasificación bioambiental de la República Argentina. Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

Ley 27.637 (2022). Ampliación del régimen de Zona Fría. Enargas

Ley 27.742 (2024). Ley de Bases y Puntos de Partida para la Libertad de los Argentinos. Recuperado de <https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/310189/20240708>.

Ley 27742 (2024). Ley de Bases y Puntos de Partida para la Libertad de los Argentinos. Recuperado de <https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/310189/20240708>.

Sector Residencial. Acondicionamiento térmico (2021). Disponible en: https://www.eficienciaenergetica.net.ar/img_publicaciones/04271008_02.SectorResidencial-AcondicionamientoTrmico.pdf

SMN (2021). Monitoreo de la temperatura en Argentina año 2021. Servicio Meteorológico Nacional

Volhard (2016). Construire en terre allégée. Arles: Actes Sud.

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece a Martino, Natalia y a sus hijos por haber compartido su casa y tiempo para realizar los relevamientos. Asimismo, se agradece a mis directores de tesis doctoral, el Dr. Pablo Dellicompagni y el Dr. Guillermo Rolón, como así también al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – CONICET.

AUTORES

M. Laura Giovino: Magister en Energía, Ecología y Sociedad por la Universidad París-Diderot, arquitecta (UBA) y doctoranda en Ciencias, área Energías Renovables como becaria CONICET. Complementa su formación en Artes Visuales en UNA e ISI SURAKARTA en Indonesia donde participó de muestras individuales y colectivas. Trabajó en proyectos ambientales en torno a los conflictos energéticos en la amazonia. En arquitectura aborda temas de eficiencia energética, estrategias bioclimáticas y técnicas constructivas con tierra, los cuales investigó en Francia, Marruecos y Argentina.