

CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE LOS CIELOS DE BARRO ALIGERADO EN VIVIENDAS ANDINAS

Sergio Alfaro¹, Massimo Palme², Beatriz Yuste³

¹Universidad Católica del Norte, Chile, salfaro@ucn.cl

²Universidad Técnica Federico Santa María, Chile, massimo.palme@usm.cl

³Universidad Politécnica de Valencia, España, bea.yuste@gmail.com

Palabras clave: resistencia térmica, techumbre, arquitectura vernácula, confort ambiental, fibras vegetales

Resumen

La arquitectura vernácula andina respeta el entorno natural, utiliza recursos como la tierra, fibras vegetales, animales, y los integra sosteniblemente en la construcción de sus viviendas, como parte de los saberes y costumbres comunitarias. Dentro de estos saberes constructivos se encuentran los cielos de barro aligerado, cuya práctica se mantiene actualmente viva sólo por algunos pocos cultores, debido al desuso, la discontinuidad en su transmisión y la sustitución por materiales industriales. Esta investigación pretende aportar al rescate y puesta en valor de este saber, a través de la caracterización de su desempeño térmico y el análisis de sus propiedades físicas y químicas. La caracterización se realizó mediante la monitorización de dos casos de viviendas del poblado de Tacora con cielos de distintos materiales, uno de totora y uno de barro con paja. Durante cuatro meses se tomaron datos con instrumentos higrotérmicos y meteorológicos, sus resultados se modelaron y complementaron con análisis de muestras materiales y probetas elaboradas en terreno. Los ensayos térmicos normalizados se realizaron en los laboratorios de la Universidad del Bío Bío. El índice de plasticidad del suelo y los análisis de estructura y caracterización de compuestos se realizaron en laboratorios de la Universidad Católica del Norte (UCN). A partir del análisis de los resultados se pudo determinar que las viviendas con cielo de planchas de barro y paja alivianada poseen un confort ambiental similar al de las viviendas con cielo de totora y una conductividad térmica lineal de $0,1477 \text{ W/m}\times\text{K}$, cercano a un buen material aislante. El índice de plasticidad de 21% arrojó un valor de alta plasticidad y de mediana compresibilidad, factor que demuestra las grietas entre la fibra de pasto y la matriz arcillosa.

1 INTRODUCCIÓN

El paisaje natural predominante en la cordillera de los Andes está marcado por las condiciones de un desierto a gran altura. En este contexto ecológico, los recursos naturales disponibles en el entorno son las tierras, arcillas y arenas, paja brava denominada localmente como *ichu* o *cikuya wichu*, la *quéñoa* o árbol de altura y los cueros de camélido; todos ellos tienen un uso y cumplen funciones específicas en los sistemas constructivos de la arquitectura vernácula andina.

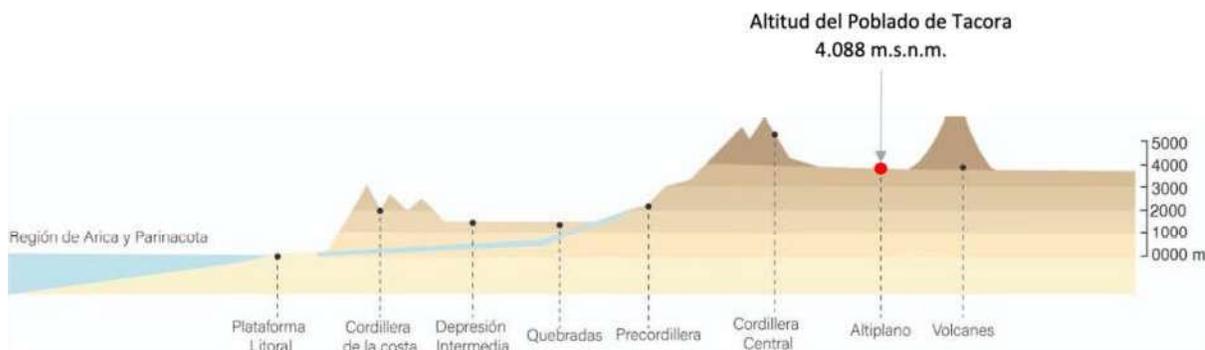


Figura 1. Perfil altitudinal región de Arica y Parinacota, Chile, muestra la ubicación de la zona del caso de estudio

El caso de investigación se sitúa en el Norte de Chile, en la localidad de Tacora, que es un poblado de la comuna de General Lagos, cercano al tripartito con Perú y Bolivia, con una población de alrededor de 15 habitantes y una altitud de 4.088 m (figura 1), cerca de la aldea Puchine y Villa Industrial, cuyas coordenadas corresponden a 17° 46' 23" sur, 69° 43' 29" oeste.

Las condiciones climáticas también favorecen el uso de determinados elementos naturales presentes en este contexto ecológico del altiplano. El tipo especial de clima que se genera en esta altura corresponde a la clasificación climática de Koppen ETW(w), y se define como tundra, por efecto de la altura con precipitación estival. En el caso específico de Tacora, Chile, lugar donde se llevó a cabo la investigación para la caracterización térmica, las temperaturas son muy bajas: la media anual es de 11°C, el mes más templado es noviembre con un promedio principal característica es el aumento de las precipitaciones que alcanzan los 300 mm de agua caída en el año. La precipitación media anual es de 610 mm. El mes que registra mayores precipitaciones es enero con lluvias torrenciales durante el invierno altiplánico con 152 mm y con precipitaciones más bajas junio, julio y agosto, con una media de 5 mm (Meteoblue, s.f.). En cuanto a la humedad relativa (HR%), según lo que informa la dirección meteorológica de Chile, la humedad media anual es de 47%. El registro de la humedad relativa más alta del año es en el mes febrero con un 65% y el registro más bajo en agosto con un 34% de humedad. La dirección del viento predominante en Tacora es mayoritariamente en un sentido oeste a este en invierno. Sin embargo, en los meses de verano no tiene una dirección determinada, la dirección varía a sureste y noroeste (Meteored, s.f.)

1.1 Rescate tecnológico de los saberes vernáculos para el aislamiento térmico de la arquitectura andina

El desarrollo de la investigación tuvo lugar en el eje de recorrido norte sur, que va desde Tacora a Guallatiri a lo largo de la ruta andina a una altitud sobre los 4.000 m en el territorio de la región de Arica y Parinacota. A lo largo de esta ruta se fueron encontrando evidencias de viviendas con cielos de barro y paja en las estancias de Ancuta, Guallatire, Chua y Misitune, como se muestra en la figura 2. Al extremo norte se muestra poblado de Tacora, donde se inició el estudio, y en el extremo sur se indica la localidad de Guallatire, donde este sistema constructivo cambia de nombre a “t’ajta”

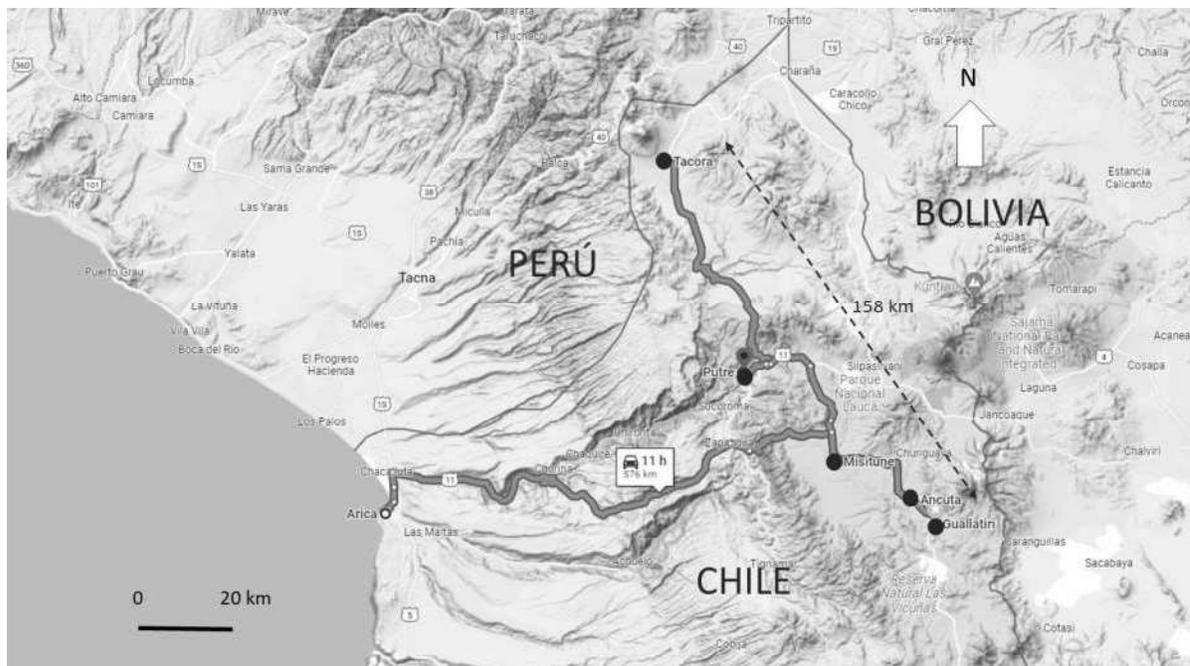


Figura 2. Trayecto y ubicación de los poblados visitados durante la investigación en la región de Arica y Parinacota

1.2 La vivienda andina

En este contexto geográfico se desarrolla la vivienda andina, que emplea los recursos de su entorno para crear espacios de resguardo, descanso y trabajo lo más confortables posibles. La identidad de las personas en el altiplano se ve fuertemente asociada al entorno, los símbolos, las tradiciones y la familia.

Estos conceptos están íntimamente integrados a la construcción de identidad y favorecen el sentido de pertenencia, es así como se ha logrado superar el impacto de los procesos sociopolíticos experimentados por el pueblo andino en el desarrollo y expresión cultural.

La construcción de la vivienda en sí misma tiene una gran importancia debido a que simboliza el inicio de una nueva familia en la protección y la prosperidad de esta, así como el final de la misma. La vivienda vernácula andina forma parte de un sistema donde la comunidad se une en torno a unos valores de reciprocidad y colaboración, no solo entre las personas, sino también con la naturaleza, por lo tanto, este profundo conocimiento del entorno se traduce en un ingenio creativo a través de prácticas constructivas tradicionales.

1.3 Los cielos de barro aligerados en la vivienda andina

Los cielos de barro aligerados de las viviendas andinas se conforman con planchas de los materiales antes señalados, dispuestos sobre la estructura de la techumbre (figura 3). Este sistema constructivo recibe distintos nombres según la zona geográfica donde se encuentre: en la zona andina tripartita con Chile, Perú y Bolivia recibe el nombre de *caruna* o *karuna* que significa manta en lengua quechua (Weber et al., 1998); más al sur, en la zona de Guallatire, Chile, se denomina *takta* o *torta*, tal como lo refieren (Villagrán; Castro, 2004; García et al., 2018); en el área andina de la Región de Tarapacá se le conoce como “*p'ira* o *t'itll'*”. (Šolc, 2011)

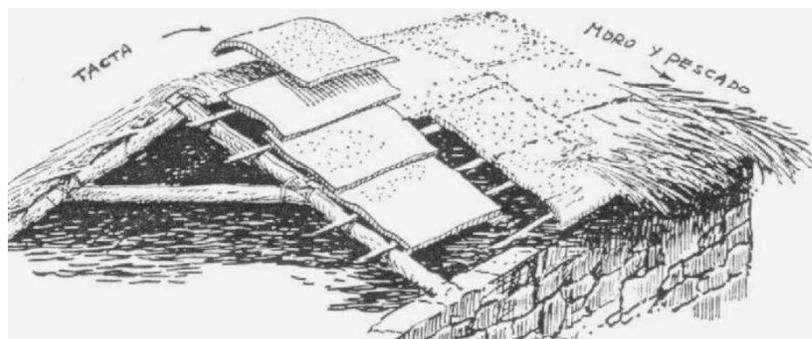


Figura 3. Diagrama de los elementos constructivos del cielo de barro aligerado (Contreras, 1974)

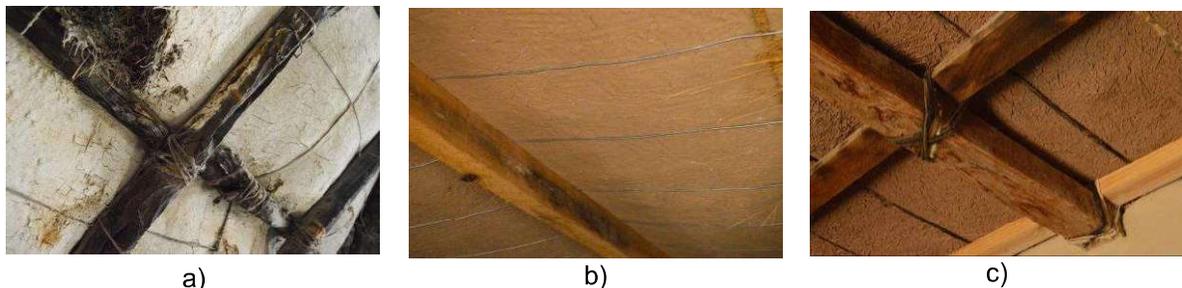


Figura 4. a) Caruna amarrada con cuero de llamo. Costaneras y tijerales de madera de queñoa;
 b) Caruna amarrada con alambre metálico; costaneras y tijerales de madera de pino cepillado;
 c) Caruna amarrada con cuero de vacuno. Costaneras y tijerales de madera de pino en bruto

1.4 Cielos de totora

El proceso constructivo del cielo de barro aligerado es una técnica indiscutiblemente colaborativa, que requiere cuadrillas de al menos cuatro participantes, dado que el proceso y

el tratamiento de sus materiales, debe ser continuo en sus diferentes etapas, su fabricación consiste en el acopio y preparación de los materiales, principalmente paja, tierra arcillosa y arena; el tendido de una capa de paja sobre una superficie regular y lisa y sobre la superficie la mezcla de un barro líquido con los pies hasta conseguir una capa uniforme y regular; tras unos minutos de secado la plancha de barro se corta, enrolla y trasladada hasta la estructura de la techumbre sobre la que será colocado (figura 4) (Yuste et al., 2019).

Actualmente esta técnica se mantiene viva sólo por algunos cultores, se enfrenta al desuso, discontinuidad en su transmisión y sustitución por materiales industriales.

Las esteras de totora empleadas en los techos de los prototipos de vivienda en Tacora se obtuvieron en la zona costera de la ciudad de Arica, Chile.

En este entorno, la totora ha sido tratada de manera tradicional como materia prima esencial, desempeñando un papel en la vida cotidiana utilitaria y decorativa de esta zona del país. La técnica empleada en el poblado de Tacora se denomina “hoja de totora de un solo tallo” (figura 5).

Estas láminas se utilizan en cubiertas porque su superficie libre de nudos permite que el agua fluya libremente y evita goteras. La capa externa debe reemplazarse cada 6 meses, pero las internas pueden durar períodos más largos.

La colocación del techo de totora se llevó a cabo sobre una estructura de madera que consistía en vigas sólidas de pino aserrado con dimensiones de 2x3” (figura 6). Sobre esta base se colocaron costaneras de pino de 2x1”, donde se instalaron las esteras de totora de 1,20 m de ancho, con el propósito de cubrir todo el espacio del recinto, se dispusieron al menos 3 secciones de esteras traslapadas entre sí a 20 cm.

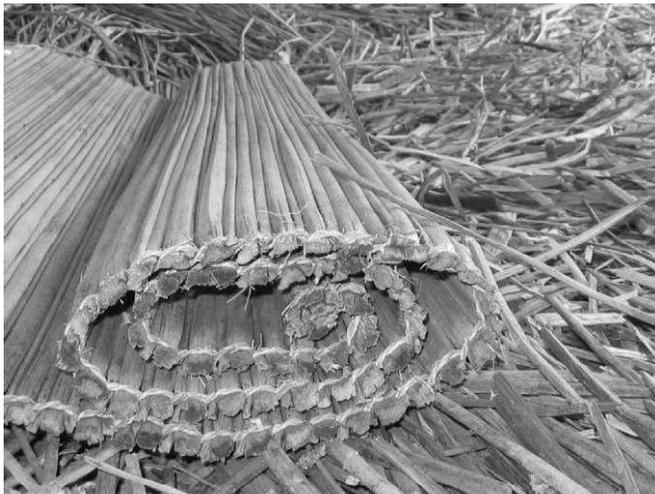


Figura 5. La fotografía muestra los tallos de totora tejidos en los extremos con hilos de nailon o totora para mantener los tallos juntos



Figura 6. Vista interior prototipo vivienda con cielo de totora, caso de estudio Tacora 2021 (Fuente Fundación Altiplano 2018)

2 DESARROLLO

Se seleccionaron dos viviendas del poblado de Tacora (figuras 7 y 8) que poseían cielos de distintos materiales, uno de totora y otro de barro con paja. Durante cuatro meses se monitorizaron y recopilaron sus datos, utilizando instrumentos higrotérmicos y meteorológicos para modelar las condiciones ambientales dentro y fuera de las viviendas seleccionadas, las mediciones se realizaron a diferentes horas del día para tener en cuenta las variaciones diurnas y nocturnas.



a)

Figura 7: Caso de estudio (TAC-02) vivienda con cielo de caruna. Sistema mixto: materiales vernáculos con materiales industrializados. Emplazamiento caso, muestra fachada exterior vivienda y cielo interior dentro del poblado de Tacora



b)



c)



a)

Figura 8: Caso de estudio (TAC-04) vivienda con cielo de totora. Sistema mixto: materiales vernáculos con materiales industrializados. Emplazamiento caso, muestra fachada exterior vivienda y cielo interior dentro del poblado de Tacora



b)



c)

Para determinar las condiciones de temperatura y humedad iniciales dentro de cada recinto donde se instalaron posteriormente, se utilizaron los siguientes equipos: una estación de medición del confort (Testo 400) compuesta por, un termómetro de globo para la medición de temperatura media radiante, un anemómetro de hilo caliente para la medición de la velocidad del aire, un termómetro para la medición de la temperatura ambiente, un higrómetro para la medición de la humedad relativa, un registrador procesador para el cálculo del voto medio previsto.

Posteriormente se instalaron los equipos de medición y almacenamiento permanente de datos de temperatura y humedad marca Elitech, estos equipos poseían una sonda exterior que se instaló en contacto directo sobre los materiales de interés. Para la determinación de la conductividad térmica de los materiales utilizados en la elaboración de los cielos de barro y paja alivianados, se tomaron muestras frescas de los materiales de los cielos y se elaboraron probetas en terreno para su posterior análisis en laboratorio.

La caracterización fisicoquímica de los materiales se realizó a través de ensayos de plasticidad de las muestras del material, la caracterización química y composición de elementos se obtuvo a través de la observación con microscopio electrónico con barrido de rayos “x”, realizado en el laboratorio mineralógico de la Universidad Católica del Norte (MAINI). Luego de la fase de laboratorio se procedió a realizar los análisis de datos recopilados durante la monitorización y los resultados de los análisis de laboratorio utilizando métodos estadísticos y de modelado digital. El objetivo de esta fase fue determinar las relaciones entre los diferentes factores y su impacto en el desempeño térmico de las viviendas. Finalmente se realizó la interpretación de los resultados y se elaboraron las conclusiones, a partir de los análisis realizados.

2.1 Ensayos de laboratorio

Los resultados de la monitorización se complementaron con análisis de muestras materiales y probetas elaboradas en terreno por el cultor proveniente de la localidad de Visviri, Chile, pueblo fronterizo a Bolivia. Los ensayos térmicos normalizados se realizaron por el Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción (CITEC) de la Universidad del Bío Bío, mientras que los ensayos de plasticidad de suelo utilizado para fabricar la “Caruna” fueron realizados por el Laboratorio de Investigación y Ensaye de Materiales de la Universidad Católica del Norte (LIEMUN). Finalmente, los análisis de estructura y caracterización de compuestos de las muestras ensayadas fueron realizados por la Unidad de Equipamiento Mayor MAINI UCN, mediante barrido de rayos X.

Se mencionan a continuación un listado de los ensayos realizados:

- a) Ensayo conductividad térmica lineal. La probeta ensayada en laboratorio consistió en un material natural fabricado en base suelo-paja, denominado por el cliente como caruna, de dimensiones 30 cm x 30 cm x 0,5 cm y densidad seca aparente de 1252 kg/m³ y ensayada de acuerdo al laboratorio.
- b) Ensayo de determinación de los límites de consistencia -límite líquido y límite plástico- de acuerdo con las normas NCh 1517-1 (1999) y NCh 1517-2 (1999), respectivamente.
- c) Ensayo de equivalente de arena, de acuerdo con la NCh 1325 (2010). Se ensayó el límite de consistencia para ambas muestras de suelo, la 25313-1 que correspondió a una mezcla de suelos finos con un porcentaje de arcilla por determinar y la muestra 25313-2, que consistió principalmente en arena adicionada al proceso de amasado durante el proceso de la elaboración de la caruna in situ.

2.2 Monitorización

El levantamiento de datos climáticos se obtuvo mediante una campaña de medición en terreno para determinar con precisión el comportamiento ambiental interior y exterior de las viviendas. En cuanto a la medición interior, se instalaron equipos de medición de temperatura y humedad (Datalogger) los cuales se posicionaron a nivel de cubierta en cada uno de los dos prototipos de viviendas mencionados anteriormente (figuras 9 y 10).

De acuerdo con las consideraciones anteriores el estudio se realizó en el poblado de Tacora, dado que allí se contaba con una intervención contemporánea y reciente del uso de la caruna a propósito de la restauración del poblado que se hizo en 2018, y la segunda razón fue la posibilidad de contar con un material de contraste, considerado también un buen aislante térmico, en el encielado de las casas con el uso de la totora; para ello se seleccionaron

inicialmente cuatro viviendas, dos con cielo de “barro y paja” y dos con cielo de “totora”, para luego monitorizar dos de ellas.

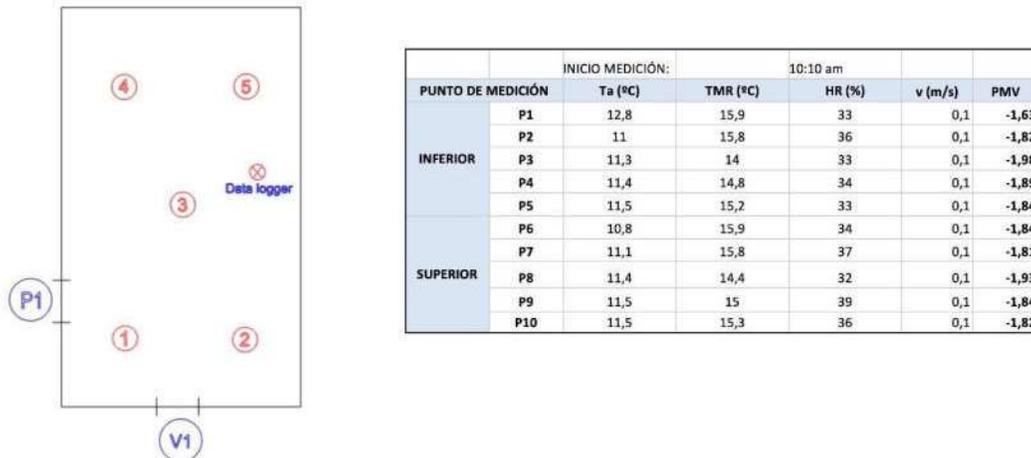


Figura 9. Caso 1: cielo de totora (fibra natural). Planta indica puntos de recogida de datos y la tabla presenta datos de la vivienda



Figura 10. Caso 2: cielo de caruna (barro y paja alivianada). Planta indica puntos de recogida de datos y la tabla presenta datos de la vivienda

Los equipos instalados correspondieron a pequeños termógrafos de registro que permiten almacenar gran cantidad de datos durante extensos periodos. Para efectos de esta investigación los equipos se configuraron para obtener información cada 15 minutos durante un periodo de 5 meses (julio- noviembre).

Si bien, con cierto desfase de horario en la toma de datos, los resultados muestran un comportamiento térmico algo mejor para el caso de cubierta de caruna, con temperaturas medias radiantes entre los 18°C y los 20 °C, cosa que se concreta en una indicación del PMV de -0,8 (ambiente ligeramente fresco).

3 RESULTADOS

3.1 Caracterización térmica

Respecto de las propiedades térmicas hay varios estudios que han venido estableciendo una base de referencia para conocer las propiedades de los sistemas constructivos mixtos que utilizan suelo y paja alivianada como aislante, recubrimientos o masa de relleno en tabiquerías de muros o techumbre, al respecto es necesario destacar las investigaciones previas de Weiser et al. (2020), Volhard (2016) y Vinceslas et al. (2019).

Se obtuvieron resultados de la monitorización para un día típico del mes de julio, con oscilaciones de temperatura interior entre 1°C y 22°C, tanto para el caso de la cubierta de caruna como para el caso de la cubierta de totora. Este resultado, si bien muestra cierto grado de enfriamiento nocturno por debajo de niveles considerados como aceptables para estar en

confort, evidencia que el aislamiento térmico ofrecido por la caruna es similar al ofrecido por otros materiales tradicionalmente utilizados en cubiertas de viviendas de las zonas altoandinas.

De acuerdo con los datos obtenidos en las mediciones del monitoreo realizado desde los meses de julio a noviembre en Tacora, se aislaron los datos correspondientes a la situación más desfavorable de invierno, que correspondió al mes de julio de 2022. El gráfico muestra los valores de temperatura promedio que alcanzaron los distintos materiales testados en terreno, contrastados con las temperaturas máximas y mínimas exteriores para dicho mes; se puede observar que la temperatura exterior más alta promedio alcanzó los 12°C, mientras que la temperatura mínima exterior promedio alcanzó los -2°C.

La temperatura más alta interior alcanzada por la caruna se ubicó sobre los 23°C, mientras que la temperatura promedio más alta alcanzada por el cielo de totora alcanzó los 20°C, a su vez la temperatura mínima mayor la alcanzó la totora con alrededor de 3°C, mientras que la temperatura mínima interior que alcanzó la caruna osciló entre los 1°C y 2°C.

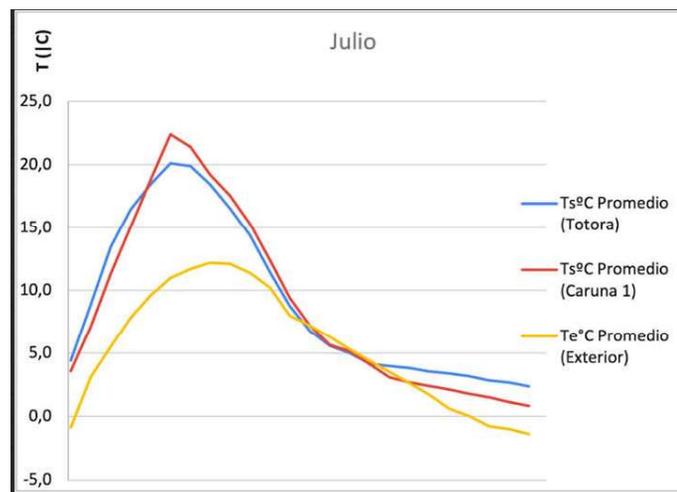


Figura 11. Monitorización de desempeño, día típico del mes de Julio

A partir de los dos casos de estudio y de los ensayos de laboratorio se pudo determinar que las viviendas con cielo de planchas de barro y paja alivianado, como se muestra en la tabla 1, poseen un confort ambiental similar al de las viviendas con cielo de totora y una conductividad térmica de 0,1477 W/mK.

Tabla 1. Resultados del ensayo de conductividad térmica NCh 851 (Fuente CITEC-UBB)

Resistencia térmica (e=15 mm)	0,24	m ² .K/W
Conductividad térmica	0,1477	W/m.K
Densidad del material seco (d)	1252	kg/m ³
Humedad del material (H)	22,32	%

La cubierta liviana que usa caruna logra un desempeño térmico mejor a las losas sin aislar, y comparable con las cubiertas de barro o de madera (tabla 2). Respecto a las cubiertas de chapa metálica, la ventaja es todavía mayor, mejorando también el valor del retraso de la ola térmica, indicador de la inercia térmica de la cubierta.

Los datos de la tabla indican para los valores de transmitancia térmica, que, en la medida que la magnitud es mayor el material tiene menor capacidad aislante. Un cerramiento con un buen material aislante (5-8 cm) alcanza valores de transmitancia térmica del orden de 0,6-0,4 W/m² K.

Tabla 2. Tabla resumen de valores de transmitancia térmica (Palme et al., 2014; Neila, 2006)

Capas de materiales	Espesor (cm)	Transmitancia (W/m ² ×K)	Time Lag
Caruna 5 mm + fieltro 1 mm + zinc 2 mm	0,8	5,75	30 min
Caruna 10 mm + fieltro 1 mm + zinc 2 mm	1,3	4,76	40 min
Caruna 20 mm + fieltro 1 mm + zinc 2 mm	2,3	3,63	1 h 30 min
Cement roof	15	4,48	2 h 50 min
Zinc roof	0,2	7,14	1 min
Earth roof	7	3,60	1 h 11 min
Wooden roof	5	2,56	1 h 30 min

Los cerramientos de techumbre comúnmente utilizados en las viviendas de los pueblos andinos, sin embargo, son cubiertas livianas de zinc, cubiertas de torta de barro, o cubiertas de madera. En algunos casos, se observa el uso de losas de hormigón en viviendas de construcción reciente. La cubierta liviana que usa caruna, logra un desempeño térmico mejor a las losas sin aislar, y comparable con las cubiertas de barro o de madera. Respecto a las cubiertas de chapa metálica, la ventaja es todavía mayor, mejorando también el valor del retraso de la ola térmica, indicador de la inercia térmica de la cubierta. Este resultado se encuentra alineado con los resultados obtenidos por otros estudios (Palme et al., 2014; Palme et al., 2012). Aumentando el espesor de la caruna, el desempeño térmico puede mejorar proporcionalmente, pudiendo alcanzar a partir de los 40 mm de espesor los valores de resistencia térmica típicamente ofrecidos por techos de madera. Con 80 mm se pueden tener valores de resistencia térmica comparables a los que se obtienen con típicos paneles prefabricados que incorporan materiales aislantes.

3.2 Resultados de los ensayos de caracterización física del suelo empleado en la confección de la caruna

Los suelos analizados presentaron fragmentos de roca de tamaños variables de 60 a más de 500 micrones, mayoritariamente minerales silicatados, posiblemente cuarzo, feldspatos y algunos minerales arcillosos. En menor medida se reconocen algunos minerales compuestos por Fe, Ti y O. De acuerdo con la morfología de los fragmentos de roca, se podría pensar que éstos habrían sido transportados desde su fuente de origen, posiblemente volcánica, según se indicó en el informe del laboratorio.

Los resultados correspondientes al índice de plasticidad en las arcillas y el límite de porcentaje de arena, se obtuvieron a partir de material empleado para la confección de las probetas de caruna, estas muestras se caracterizaron como un material natural fabricado en base a suelo-paja, de dimensiones 30 cm x 30 cm x 0,5 cm y densidad seca aparente de 1252 kg/m³, esta muestra presentó sólo un 1% de equivalente de arena, lo que indicó que era eminentemente arcillosa, compuesta esencialmente por un 99% de arcilla, es importante señalar que la fracción de arena que se utilizó en la mezcla de suelo adicionada al material base correspondió a 0,473 litros, lo que significó un 5% del volumen seco.

Consideraciones acerca de la densidad aparente del material ensayado y su caracterización como un material liviano, el valor de referencia obtenido es 52 kg/m³ más denso que el límite de densidad establecido para una matriz de barro y paja considerada como liviana cuya densidad se sitúa en 1200 kg/m³, como lo señalan Wieser et al. (2020).

Por su parte, la interpretación de los resultados para el ensayo del límite líquido de acuerdo con Casagrande (1932) indica que los suelos con un límite líquido superior a 50% (LL>50%) son de alta plasticidad, mientras que los suelos que tienen un límite líquido inferior a 50% se

definen de baja plasticidad. Los resultados obtenidos sitúan al material con el que se confeccionó la caruna cercano al límite de alta plasticidad.

Respecto de la plasticidad de las muestras ensayadas, hacen referencia a su capacidad para deformarse sin romperse cuando se someten a cambios de presión o de humedad. Un suelo de alta plasticidad puede soportar una deformación considerable sin agrietarse, lo que puede ser beneficioso en condiciones de cambios ambientales o de carga, el índice de plasticidad obtenido de los ensayos alcanzó un 21%, lo que implicó que el material ensayado poseía una alta plasticidad y mediana compresibilidad, factor que pudo influir en las grietas observadas a través del barrido con rayos X entre la fibra de pasto y la matriz arcillosa.

3.3 Análisis visual de la disposición de las fibras

Permitió reconocer la orientación y distribución de la paja, observado las superficies del anverso y reverso de la probeta, en este reconocimiento se llegó a establecer mediante el método de conteo que: en la cara inferior se identificaron 79 fibras que comparativamente con la cara superior representan un 59% del total de fibras de ambas superficies, en este recuento se identificaron 47 fibras, que representan un 40,5% que van desde los bordes hasta el interior de la probeta y que son mucho más largas que las fibras interiores, mientras que las fibras cortas que no tocan los bordes de la probeta contabilizaron 32, respecto de la cara superior las fibras de esta cara son mucho más finas y largas.

En la cara superior se identificaron un total de 54 fibras, que comparativamente con la cara inferior representan un 41% del total de ambas superficies, 23 fibras, que representan un 42,59% van desde los bordes al interior, mientras que las fibras cortas que no tocan los bordes de la probeta contabilizaron 31 fibras, que representan un 57,40%, respecto de la cara inferior las fibras de esta cara son más anchas y en menor cantidad que la cara inferior.

Estos conteos tendrían implicancias a la hora de considerar los factores de resistencia a la flexión de la plancha una vez que se deposita sobre la estructura de techumbre y la plancha inicia el proceso de secado y con ello analizar el factor de agrietamiento frente a los efectos de la retracción de las arcillas al eliminar el agua del amasado y comenzar el proceso de secado y consolidación del material.

Al depositar las fibras por capas sucesivas y de forma multidireccional, sumado a la compresión que se ejerce con el pie para que penetre la matriz de barro entre las capas de fibra, hace que éstas se concentren en la zona inferior de la plancha dejando y de esta manera se logre un mejor comportamiento a los esfuerzos de tracción y flexión en la manta de caruna.

Dicha concentración de fibras en la zona inferior de la plancha puede tener varias implicaciones para el comportamiento estructural de la misma, mejora en la resistencia a la tracción y a la flexión: las fibras, cuando están alineadas y distribuidas de manera uniforme, pueden proporcionar una resistencia considerable a la tracción y a la flexión.

Esta propiedad se acentúa cuando las fibras se concentran en la parte inferior de la plancha, donde los esfuerzos de tracción suelen ser más altos en una estructura en voladizo, en este caso el momento flector genera tensiones de tracción en las fibras superiores., como puede ser el cielo de una vivienda.

La mayor concentración de fibras en la parte inferior de la plancha puede ayudar a prevenir o limitar la formación de grietas entregando una protección adicional contra las grietas, las fibras actúan como un refuerzo, distribuyendo las tensiones y ayudando a mantener la integridad de la plancha incluso cuando se producen movimientos o cargas.

4 CONSIDERACIONES FINALES

Los materiales vernáculos, en este caso, las planchas de barro y paja alivianada y la totora, parecen proporcionar una eficacia térmica comparable a los materiales industriales modernos. Esto sugiere que su uso continuado puede contribuir a la sostenibilidad y resiliencia de las viviendas en regiones similares.

El índice de plasticidad de 21% indica que el suelo utilizado en estas construcciones posee propiedades que pueden ser beneficiosas en ciertas condiciones, aunque su mediana compresibilidad puede ser una limitación. En el caso de la caruna, su ubicación en el límite de alta plasticidad sugiere que tiene cierta capacidad para soportar deformaciones, pero que podría no ser tan resistente a la deformación como los suelos de alta plasticidad ($LL > 50\%$).

Esto puede tener implicaciones para su uso en la construcción, particularmente en lo que respecta a su resistencia a la compresión y a la carga, su capacidad para soportar cambios en la humedad y su capacidad para mantener su forma y resistencia a lo largo del tiempo. Sería útil investigar más a fondo cómo mejorar esta característica, posiblemente a través de técnicas de mezcla o preparación del suelo.

Respecto de la caracterización de la composición química del suelo, este tipo de suelo parece tener varias propiedades que podrían ser beneficiosas para su uso en la construcción de viviendas, incluyendo la resistencia mecánica, retención de calor y el aislamiento térmico. Sin embargo, es importante tener en cuenta la potencial expansión y contracción de los minerales arcillosos, así como los posibles problemas de erosión y oxidación relacionados con los minerales de Fe, Ti y O.

La concentración de fibras en la parte inferior de la plancha de barro, resultado del método de fabricación descrito, parece tener beneficios significativos en términos de mejorar la resistencia a la tracción y a la flexión, así como en la prevención de grietas. Este hallazgo subraya la importancia de las técnicas de construcción tradicionales y la incorporación de fibras naturales en la construcción vernácula, proporcionando una mayor resistencia y durabilidad al material de construcción.

Por lo tanto, aunque la caruna parece tener una buena conductividad térmica y puede proporcionar un ambiente confortable en las viviendas, es importante tener en cuenta su nivel de plasticidad al considerar su uso en la construcción, y podrían ser necesarios pasos adicionales para mejorar su resistencia y durabilidad.

La investigación hasta la fecha sugiere que tanto las planchas de barro y paja alivianada como la totora, son eficaces para mantener un confort ambiental. Respecto de la totora sólo se pudo acceder a datos de su comportamiento térmico gracias a publicaciones de investigaciones recientes realizadas a este material, es importante continuar la investigación para explorar en profundidad las propiedades y el rendimiento de estos materiales en una variedad de condiciones ambientales y de uso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Casagrande, A. (1932). Investigación sobre los límites de los suelos de Atterberg. *Vías públicas*, vol. 13, núm. 3, 121-130.

Contreras, C. (1974). Arquitectura y elementos constructivos entre los pastores de la pampa de Lirima (Prov. de Tarapacá). *Revista De Geografía Norte Grande*, 1, 25-33.

García M.; Castro, V.; Belmonte, E.; Muñoz, T.; Santoro, C.; Echeverría, J. (2018): Etnobotánica y territorio en el pastal de Mulluri (Norte de Chile). *Las enseñanzas del pastoreo aymara*. *Bol Latinoam Caribe Plant Med Aromat* 17 (5): 522 – 540.

Meteoblue (s.f.). Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados para Tacora. Disponible en: https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/tacora_chile_3870352
Recuperado el 11 de octubre de 2022

Meteored. (s.f.): El tiempo en Tacora. Disponible en: <https://www.tiempo.com/tacora.htm>, Recuperado el 11 de octubre de 2022

NCh 851 (2008). Aislación térmica - Determinación de propiedades de transmisión térmica en estado estacionario y propiedades relacionadas - Cámara térmica calibrada y de guarda. Chile: Instituto Nacional de Normalización.

NCh 1517-1 (1999). Mecánica de suelos- límites de consistencia – parte 1: determinación del límite líquido. Chile: Instituto Nacional de Normalización.

NCh 1517-2 (1999). Mecánica de suelos- límites de consistencia – parte 2: determinación del límite plástico. Chile: Instituto Nacional de Normalización.

NCh 1325 (2010). Áridos – Determinación del equivalente de arena en suelos y áridos finos. Chile: Instituto Nacional de Normalización

Neila, J. (2006). Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible. Madrid: Ed. Munilla-Lira

Palme, M.; Guerra, J.; Alfaro, S. (2012). Earth of the Andes comparing techniques and materials used in houses in San Pedro de Atacama. Proceedings of the Passive and Low Energy Architecture Conference 2012, Lima, Perú.

Palme, M.; Guerra, J.; Alfaro, S. (2014). Thermal performance of traditional and new concept houses in the ancient village of San Pedro de Atacama and surroundings. Sustainability 2014, 6, 3321-3337.

Šolc, Václav. (2011). Casa Aymara en Enquelga. Chungará, Revista de Antropología Chilena (Arica), 43(1), 89-111.

Villagrán, C.; Castro, M. V. (2004). Ciencia indígena de los Andes del Norte de Chile: programa interdisciplinario de estudios de biodiversidad (PIEB). Universidad de Chile. Santiago: Editorial Universitaria.

Vinceslas, T.; Colinart, T.; Hamard, E.; de Ménibus, A. H.; Lecompte, T.; Lenormand, H. (2019). Light earth performances for thermal insulation: Application to earth-hemp. En *Earthen Dwellings and Structures*, p. 357-367. Singapore: Springer.

Volhard, F. (2016). Light earth building. A handbook for building with wood and earth. Basilea, Suiza: Birkhäuser.

Weber, David J.; Cayco, F.; Cayco, T.; Ballena, M. (1998) Rimaycuna, Quechua de Huánuca. Diccionario del quechua del Huallaga con índices castellano e inglés. Lima: Instituto Lingüístico de Verano.

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

Yuste, B. Pereira, M.; Aninat, A.; Mamani, E. (2019). Caruna, el rescate de un aislante natural de tierra. 19° Seminario Iberoamericano de arquitectura y construcción con tierra. Oaxaca, México. FUNDASAL; PROTERRA, p. 630-638

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Servicio Nacional del Patrimonio Cultural, MINCAP, Proyecto 49204, Rex N° 053 de 04-05-2022 financiado por el Fondo del Patrimonio Cultural, submodalidad investigación, registro y levantamiento del patrimonio cultural, concurso regional, convocatoria 2021.

Además agradecen la valiosa contribución de Fundación Altiplano y de su equipo de profesionales, personal técnico y administrativo, al equipo directivo y estudiantes del Liceo Técnico Granaderos de Putre y de manera muy especial el aporte invaluable de las personas de comunidades andinas que participaron en el proyecto: Sra. Teodora Flores, Sr. Pablo Chura, Sra. Isabel Nina, Sra. Elba Chura, Sr. Juan Nina, Sr. Adanto Nina, de la comunidad de Tacora; Sr. Abraham Téllez y familia, de la comunidad de Ancuta; Sr. Raimundo Jiménez. Q.E.P.D, Sr. Marco Jiménez, Sr. Gustavo Alvarado, de la comunidad de Guallatire y el Sr. Alberto Quispe, de la localidad de Chua.

Finalmente, agradecen la colaboración desinteresada del Laboratorio de Ensayo de Materiales LIEMUN de la Facultad de Ciencias de Ingeniería y Construcción de la UCN, Unidad de Equipamiento Científico MAINI, también al laboratorio de Arquitecturas Andinas y construcción con tierra LAAyCT de la Universidad Nacional de Jujuy. Por todos los apoyos recibidos para la concreción del proceso de salvaguardia de este saber ancestral y genuino de la cultura aymara. Y a las siguientes entidades colaboradoras: Fundación para el desarrollo camélido altoandino MARKAS LAYKU, Escuela de Arquitectura de la UCN, Escuela de Arquitectura de la Universidad Técnica Federico Santamaría, sede Valparaíso, y en especial a sus estudiantes de Magíster, Maite Olivares y Claudia Bustamante.

AUTORES

Sergio Alfaro, Doctor en proyectos de innovación tecnológica por la Universidad Politécnica (UPV) de Barcelona, profesor asociado de la Escuela de Arquitectura de la UCN. Ha acompañado procesos de restauración del patrimonio construido en calidad de representante institucional en la restauración del

Monumento Histórico y templo de San Pedro de Atacama, Chile, templo restaurado por Fundación Altiplano, junto a esta entidad ha desarrollado investigaciones, ponencias y artículos relacionados a los aspectos tecnológicos y energéticos de la tierra como recurso para la conservación sostenible. Co-fundador junto a otros académicos del área de la arquitectura y patrimonio en tierra de la Red de Arquitectura y Construcción en Tierra (ARCOT) Chile desde 2014, y miembro de la Red PROTERRA Chile.

Massimo Palme, Ingeniero en materiales y Doctor en Arquitectura, Energía y Medio Ambiente, se desempeña como profesor asociado del departamento de arquitectura de la Universidad Técnica Federico Santa María y como profesor extraordinario del programa de doctorado en Ingeniería Sustentable de la Universidad Católica del Norte. Ha sido profesor visitante en la Universidad de Roma La Sapienza, la Universidad de Catania, la Universidad Federal de Santa Catarina, la Universidad de Kobe y el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables del Ecuador. Es actualmente el presidente de la Asociación Chilena de Simulación del Desempeño de Edificios y de la Asociación Chilena de Ecología del Paisaje. Resultados de sus investigaciones han sido difundidos a través de más de 100 artículos, capítulos y contribuciones a congresos.

Beatriz Yuste, Arquitecta y Máster en Arquitectura, Energía y Medio Ambiente por la UPC de Barcelona. Ha trabajado en proyectos de I+D en biomecánica aplicada al diseño de interiores saludables en el Instituto de Biomecánica de Valencia (UPV) y en proyectos para la preservación del patrimonio del suroeste de los Estados Unidos con Cornerstones Community Partnerships. En los últimos años se ha desempeñado como jefa de proyectos de restauración patrimonial y conservación sostenible del Plan Templos Andinos Ruta de las Misiones-Saraña con Fundación Altiplano. Actualmente es doctoranda del programa Arquitectura, Patrimonio y Ciudad (UPV).