



Revista de Arquitectura (Bogotá)

ISSN: 1657-0308

ISSN: 2357-626X

Universidad Católica de Colombia, Facultad de Diseño y
Centro de Investigaciones (CIFAR)

Wieser, Martin; Onnis, Silvia; Meli, Giuseppina
Desempeño térmico de cerramientos de tierra alivianada.
Posibilidades de aplicación en el territorio peruano

Revista de Arquitectura (Bogotá), vol. 22, núm. 1, 2020, Enero-Junio, pp. 164-174
Universidad Católica de Colombia, Facultad de Diseño y Centro de Investigaciones (CIFAR)

DOI: <https://doi.org/10.14718/RevArq.2020.2633>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=125165763015>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org
UAEM

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Desempeño térmico de cerramientos de tierra alivianada. Posibilidades de aplicación en el territorio peruano

Thermal performance of light earth enclosures. Possibilities of its application in the Peruvian territory

Martin Wieser

Pontificia Universidad Católica del Perú, PUCP. Lima, (Perú)

Departamento de Arquitectura

Silvia Onnis

Pontificia Universidad Católica del Perú, PUCP. Lima, (Perú)

Departamento de Arquitectura

Giuseppina Meli

Pontificia Universidad Católica del Perú, PUCP. Lima, (Perú)

Departamento de Arquitectura

Martin Wieser

Arquitecto, Universidad Ricardo Palma, Lima (Perú).

Magíster en Desarrollo Internacional, Fundación Politécnica de Cataluña, Barcelona (España).

Doctor en Energías y Medio Ambiente en Arquitectura, Universidad Politécnica de Cataluña (España).

 <https://orcid.org/0000-0002-4556-3507>

mwieser@pucp.pe

Silvia Onnis

Arquitecta, Università degli Studi di Firenze, Florencia (Italia).

Magíster en Arquitectura, Universidad, Università degli Studi di Firenze, Florencia (Italia).

Miembro fundador del grupo Centro Tierra-PUCP.

Fundadora de la Asociación Manos a la Tierra.

 <https://orcid.org/0000-0003-0066-9495>

sonnis@pucp.pe

Giuseppina Meli

Arquitecta, Università degli Studi di Palermo, Palermo (Italia).

Magíster en Arquitectura, Università degli Studi di Palermo, Palermo (Italia).

 <https://orcid.org/0000-0002-6087-4768>

gmeli@pucp.pe

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>



[dx.doi.org/10.14718/RevArq.2020.2633](https://doi.org/10.14718/RevArq.2020.2633)

Resumen

Las soluciones constructivas tradicionales y contemporáneas han demostrado tener serias limitaciones en cuanto a la solución del déficit cualitativo y cuantitativo de la vivienda y el equipamiento; las evidencias del desempeño térmico son igualmente desalentadoras. Por tal razón, en el presente estudio se indaga sobre la capacidad de la tierra alivianada para brindar confort térmico en los edificios, considerando los diferentes climas del territorio peruano y comparándola con los sistemas constructivos más comunes en el medio: el adobe y la albañilería de ladrillo. A partir de la caracterización previa de las cualidades térmicas de los componentes, de la realización de simulaciones térmicas dinámicas, y comparando el desempeño de diferentes prototipos digitales, se identificaron las ventajas de la tierra alivianada para brindar confort térmico en las edificaciones; el buen desempeño del material se atribuye a su marcado equilibrio entre una masa térmica media y una conductividad térmica relativamente baja. Adicionalmente, se destacan las ventajas ecológicas debido a la utilización de materiales naturales, renovables y biodegradables en la composición del sistema constructivo propuesto.

Palabras clave: arquitectura bioclimática; arquitectura sostenible; climatización pasiva; confort térmico; inercia térmica; simulación térmica; sistema constructivo; transmitancia térmica

Abstract

Traditional and contemporary construction systems have shown serious limitations in the solution of the qualitative and quantitative deficit of housing and equipment. Evidence of thermal performance is equally discouraging. That is why this study enquires about the ability of light earth to provide thermal comfort in buildings, considering the different climates of the Peruvian territory and comparing it with the most common construction systems in the environment: adobe and brick masonry. As of the previous characterization of the components' thermal qualities, the carrying out of dynamic thermal simulations and comparing the performance of different digital prototypes, the virtues of light earth to provide thermal comfort in buildings were identified. The good performance of the material is attributed to the marked balance between a medium thermal mass and a relatively low thermal conductivity. It is the only one that meets the requirements of the current Peruvian energy efficiency standard in the case of colder climates. Additionally, the ecological advantages associated to the use of natural, renewable and biodegradable materials in the composition of the proposed construction system are highlighted.

Keywords: bioclimatic architecture; sustainable architecture; passive air conditioning; thermal comfort; thermal inertia; thermal simulation; construction system; thermal transmittance

Recibido: febrero 25 / 2019

Evaluado: septiembre 20 / 2019

Aceptado: noviembre 23 / 2019

Introducción

El presente estudio se enmarca en un proyecto de investigación financiado por el Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO), el Concejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) y la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), y el cual contempla la validación estructural y constructiva de un sistema compuesto de una estructura de madera y cerramientos de tierra alivianada, así como la construcción de un prototipo a escala real. La investigación que se presenta pretende anticipar y validar específicamente el desempeño térmico de una construcción con una envolvente de tierra alivianada en los diferentes ámbitos climáticos del territorio peruano.

En el Perú y en Latinoamérica persiste un enorme déficit cuantitativo y cualitativo de vivienda y equipamiento (Bouillon et al., 2012). A pesar de que la región ha logrado un crecimiento económico sin precedentes a lo largo de las últimas décadas, ni las políticas públicas ni las iniciativas privadas han sido capaces de resolver dicha carencia. Frente a una población crecientemente urbana, en el caso específico del Perú, las soluciones constructivas de los programas de vivienda y equipamiento se limitan casi exclusivamente al uso del ladrillo y del concreto armado. Una segunda alternativa es el uso de estructuras ligeras de madera o fibrocemento con techos de planchas onduladas. En todos los casos se identifica que el principal objetivo es reducir los costos de la edificación, sin contemplar aspectos relativos al

impacto de la construcción en el medio ambiente o a la propia habitabilidad de los edificios.

Resulta necesario ofrecer opciones constructivas que, reconociendo la gran diversidad climática del territorio peruano y sin renunciar al bajo costo, ofrezcan una estructura sismorresistente, generen un bajo impacto en el medio ambiente y provean un adecuado confort térmico a sus ocupantes. En tal sentido, se valora el potencial de las técnicas constructivas mixtas con estructura de madera (capacidad antisísmica) y cerramientos de tierra alivianada (capacidad térmica), ya que representan una alternativa con muchas posibilidades para enfrentar el problema expuesto.

Aun cuando gran parte del territorio peruano se encuentra en zonas de gran actividad sísmica, y si bien muchas técnicas y soluciones constructivas tradicionales, como las *shicras*¹ en los cimientos o la *quincha*² en las paredes, responden de manera adecuada a estas condicionantes, no existen precedentes en el Perú sobre el uso de elementos de tierra alivianada en los edificios. Las técnicas de construcción con tierra más comunes en el medio, y que mantienen aún cierta vigencia, como el adobe, el tapial o la *quincha*, han utilizado siempre mezclas de densidades relativamente altas.

La tierra alivianada (*light earth*, en inglés), como definición, es aquella mezcla de masa de tierra con una proporción alta de agregados ligeros, generalmente fibras de gramíneas, y cuya densidad final es menor a 1200 kg/m³. El uso de recursos locales, naturales, renovables y biodegradables para la concepción de los elementos presenta a este material como una alternativa potencialmente económica y de bajo impacto en el medio ambiente. Así mismo, la presencia de gran cantidad de fibras naturales en su composición genera vacíos estancos en su interior, lo que reduce considerablemente la conductividad térmica a través del material y sacrifica solo ligeramente la inercia térmica del mismo, en comparación con mezclas de tierra convencionales. Las propiedades mecánicas y físicas del material lo convierten en la actualidad en una alternativa válida para ser considerada.

En cuanto a los estudios que se han hecho sobre la tierra alivianada, y específicamente acerca de las propiedades térmicas de dicho material, sobresale el documento publicado por Franz Volhard (2016), quien recopila valores de conductividad térmica y calor específico de muestras de diferentes densidades, a partir de diversas normas e investigaciones. Se han venido desarrollando ocasionalmente estudios adicionales sobre el tema,

con un interés particular en el cáñamo como agregado natural; sobresalen en ese sentido los trabajos de Busbridge y Rhydwen (2010) y de Vincelas, T. et al. (2019). No se han desarrollado estudios en ese tema específico en el ámbito nacional ni en el latinoamericano, salvo el que sirve de precedente al presente estudio, dentro del marco de una investigación sobre la mejora de las prestaciones térmicas del sistema constructivo tradicional de la *quincha* (Wieser, Onnis y Meli, 2018).

Identificadas las propiedades térmicas de la tierra alivianada, y a partir de las posibilidades que proveen las nuevas herramientas informáticas de simulación térmica, capaces de calcular y predecir con un alto grado de fiabilidad el desempeño energético de una edificación, ha sido posible realizar el estudio de forma comparativa, considerando tanto las soluciones convencionales como aquellas concebidas a base de tierra alivianada. Los resultados permiten no solo identificar el potencial del sistema propuesto, sino también cuestionar la forma como se construye actualmente en el medio, insensible a la diversidad climática local, con las consecuencias económicas, ecológicas y de confort que eso conlleva.

Metodología

Para la valoración del comportamiento térmico de la tierra alivianada como envolvente de edificios en el Perú, se describen en primer lugar los diferentes climas en los que se evaluará el sistema y se eligen las ciudades representativas para hacer las simulaciones térmicas dinámicas. La elección de dichas ciudades se ha realizado procurando que estas coincidan con las características climáticas típicas de las diferentes zonas, además de la condición de disponer de datos fiables de dichos emplazamientos. Se ha procurado, igualmente, su cercanía relativa en el territorio, además de su ubicación en la zona sur del país, donde la mayor latitud condiciona una mayor oscilación térmica estacional.

La necesidad de insertar datos climáticos en el software de simulación requirió obtener datos meteorológicos horarios de un año típico de cada una de las ciudades en formato 'epw'³. No existe una fuente local oficial de la que se pueda obtener esta información en dicho formato, por lo que se recurrió a diversas fuentes externas. Los archivos de las ciudades de Arequipa y Cuzco son obtenidos de la página web de EnergyPlus⁴, del Departamento de Energía de los Estados Unidos (2019); los de las ciudades de Ilo, Tacna y

1 Bolsas confeccionadas a partir de tejidos de fibra natural que contienen piedras de diferentes tamaños. Se ponían ocasionalmente en las bases de los muros de las pirámides prehispánicas, para disipar la fuerza de los sismos.

2 Sistema constructivo en el que los muros están conformados por una estructura de madera, que, a su vez, contiene un tejido de caña o carrizo, y el cual es finalmente recubierto con barro.

3 Un archivo con extensión 'epw' hace referencia a formato de clima de EnergyPlus (EnergyPlus Weather Format). Contiene la información meteorológica de un año típico de una localidad específica.

4 El programa informático Energy Plus es una herramienta de cálculo térmico dinámico desarrollada por el Departamento de Energía de los Estados Unidos de Norteamérica. Su fiabilidad está ampliamente reconocida en el ámbito académico y comercial. Provee también información climática gratuita de diversas ciudades en el mundo. <https://energyplus.net/weather>

Juliaca, de la página Climate. OneBuilding⁵, y los de la ciudad de Moquegua, a partir de la interpolación realizada por el software Meteonorm 7.0⁶. En todos los casos, los datos promedio de dichas fuentes se compararon con los presentados en el portal institucional del Instituto Geofísico del Perú (2018), y así se pudo comprobar su validez.

En segundo lugar, para cada una de las ciudades se identifican los límites de temperaturas interiores que delimitan situaciones de confort térmico a partir de la teoría del confort adaptativo, para edificios acondicionados de forma pasiva (en inglés, *free running buildings*). En el presente trabajo se considerarán los estudios desarrollados por los autores De Dear y Brager (1998), los cuales confirman la relación estrecha que hay entre las condiciones de temperaturas medias exteriores mensuales y la posibilidad de lograr el confort térmico, en la medida de la capacidad de los usuarios para ajustar sus comportamientos y de su propia adaptación psicológica al medio.

Posteriormente, se presentan las propiedades térmicas de los materiales que conforman los muros y los techos que van a considerarse en los cálculos y las simulaciones posteriores, con énfasis en las de la tierra alivianada. A continuación se describen los detalles, las características geométricas y los patrones de uso del prototipo que se va a simular.

Como primera medida, con los datos previamente identificados se calculan los valores de transmitancia e inercia térmicas de las propuestas elegidas de muros y techos, lo que permite una primera valoración de los sistemas constructivos. Dichos valores se deducen con el apoyo de la herramienta informática Opaque 3.0⁷, a partir de los datos del espesor, de la conductividad térmica, del calor específico y de la densidad de los materiales que lo conforman.

En segunda instancia, se presentan los resultados de las simulaciones dinámicas realizadas en cada uno de los climas, considerando ambientes

con ausencia de equipos de climatización artificial. Dichas simulaciones se realizan mediante la herramienta informática Design Builder 4.5⁸. Los resultados del comportamiento de la temperatura interior se valorarán finalmente en función de la capacidad para proveer confort térmico a los usuarios.

Resultados

La diversidad climática del Perú

La enorme diversidad climática del Perú se debe en gran medida a la presencia de la cordillera de los Andes; esta no solo condiciona emplazamientos de diversas altitudes, sino que separa las masas de aire de la parte occidental, asociadas a las aguas frías de la corriente de Humboldt, de las masas cálidas y húmedas de la parte oriental de la selva amazónica. La única condición constante, debido a la cercanía con la línea ecuatorial, es la alta radiación, que incide en todo el territorio a lo largo del año.

Tomando como base la clasificación propuesta para efectos de diseño por Wieser (2011), el país se puede dividir en siete grandes zonas climáticas. La primera corresponde a gran parte de la franja costera desértica peruana, en la que vive casi la mitad la población, incluyendo la ciudad de Lima; tiene un clima subtropical, expuesto a las brisas marinas frescas, influenciadas por las aguas frías del océano, con temperaturas de aire bastante moderadas, de baja oscilación térmica diaria y estacional, de humedad relativa moderadamente alta y muy escasas precipitaciones. La excepción es una pequeña franja de costa al norte del país, en la que existe un clima tropical, debido a la presencia de corrientes marinas cálidas.

Una segunda zona climática es la desértica, ligeramente alejada del litoral, y en la que las brisas marinas han perdido fuerza, por lo cual la oscilación térmica es de moderada a alta, con días cálidos y noches frescas, humedad relativa moderada o baja, radiación solar más intensa y precipitaciones casi inexistentes.

La tercera zona es la continental templada, en la vertiente occidental de la cordillera de los Andes, y que, con una mayor altitud y más lejana del océano, se ubica entre los 1000 a 2300 msnm. Tiene una alta oscilación térmica diaria, con días

5 Climate. OneBuilding es un repositorio virtual de data climática de acceso libre. Para el caso del Perú, se dispone datos meteorológicos de un total de 30 estaciones. <http://climate.onedbuilding.org/default.html>

6 Meteonorm Software es un programa informático desarrollado por la compañía suiza Meteotest, capaz de brindar y generar datos climáticos de cualquier lugar del mundo, tanto de una base de datos como de la interpolación de datos de estaciones cercanas. <https://www.meteonorm.com/>

7 El programa informático Opaque 3.0 ha sido desarrollado por Robin Liggett y Murray Milne, del Energy Design Tools Group, de la Universidad de California (UCLA). <http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/>

8 El programa informático Design Builder es una de las herramientas más conocidas en el medio para realizar simulaciones térmicas dinámicas; utiliza para tal fin el motor de cálculo que provee EnergyPlus, ya mencionado en las notas. <https://designbuilder.co.uk>

Tabla 1. Zonas climáticas y ciudades representativas consideradas para el análisis de desempeño térmico.

Fuente: elaboración propia (2019).

Zona climática	Ciudad	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Temp. mínima media (°C)	Temp. máxima media (°C)
Subtropical litoral	1. Ilo	-17,69°	-71,34°	22	17,03	21,64
Desértica	2. Tacna	-18,05°	-70,28°	469	14,49	23,28
Continental templada	3. Moquegua	-17,19°	-70,94°	1517	13,05	22,16
Continental fría	4.1. Arequipa	-16,32°	-71,55°	2520	8,96	21,56
	4.2. Cuzco	-13,55°	-71,98°	3249	5,64	19,12
Continental muy fría	5. Juliaca	-15,47°	-70,16°	3826	-1,09	15,73

templados y noches frescas, de baja humedad relativa y alta radiación solar. En la medida de una mayor altitud, entre los 2300 y los 3500 msnm, se presenta el clima continental frío, con días templados, noches frías y alta oscilación térmica.

Por encima de los 3500 msnm se identifica una quinta zona climática, continental y muy fría, en la que se presentan noches con temperaturas bajo cero, frente a días frescos y generalmente soleados.

Hacia la vertiente oriental, por debajo de los 2300 msnm, se ubican los dos últimos climas: la selva tropical alta y la selva tropical baja. Ambos presentan altas temperaturas diurnas, alta humedad relativa y abundantes precipitaciones. La principal diferencia entre ellas es la menor temperatura que se alcanza en las partes altas durante las noches. Las particularidades climáticas de estas regiones condicionan el protagonismo de la ventilación y la sombra como estrategias bioclimáticas, y el cerramiento se adapta a estas necesidades. La oscilación térmica varía en función de la altitud, que resulta menor en la medida en que se ubique en zonas más bajas. Las particularidades climáticas de estas regiones condicionan el protagonismo de la ventilación y la sombra como estrategias bioclimáticas, y el cerramiento se adapta a estas necesidades. En tal sentido, dichos climas no serán considerados en la presente investigación, asumiendo que la tierra ali-

vianada resulta una alternativa válida en sí misma, siempre y cuando se consideren las estrategias bioclimáticas mencionadas y se resuelva el proyecto en términos estructurales y constructivos.

Se presenta en la tabla 1 la lista de las ciudades elegidas, junto con sus coordenadas, su altitud y la zona climática a la que pertenecen, mientras que en la figura 1 se muestra la ubicación de las ciudades sobre el mapa y en un corte esquemático.

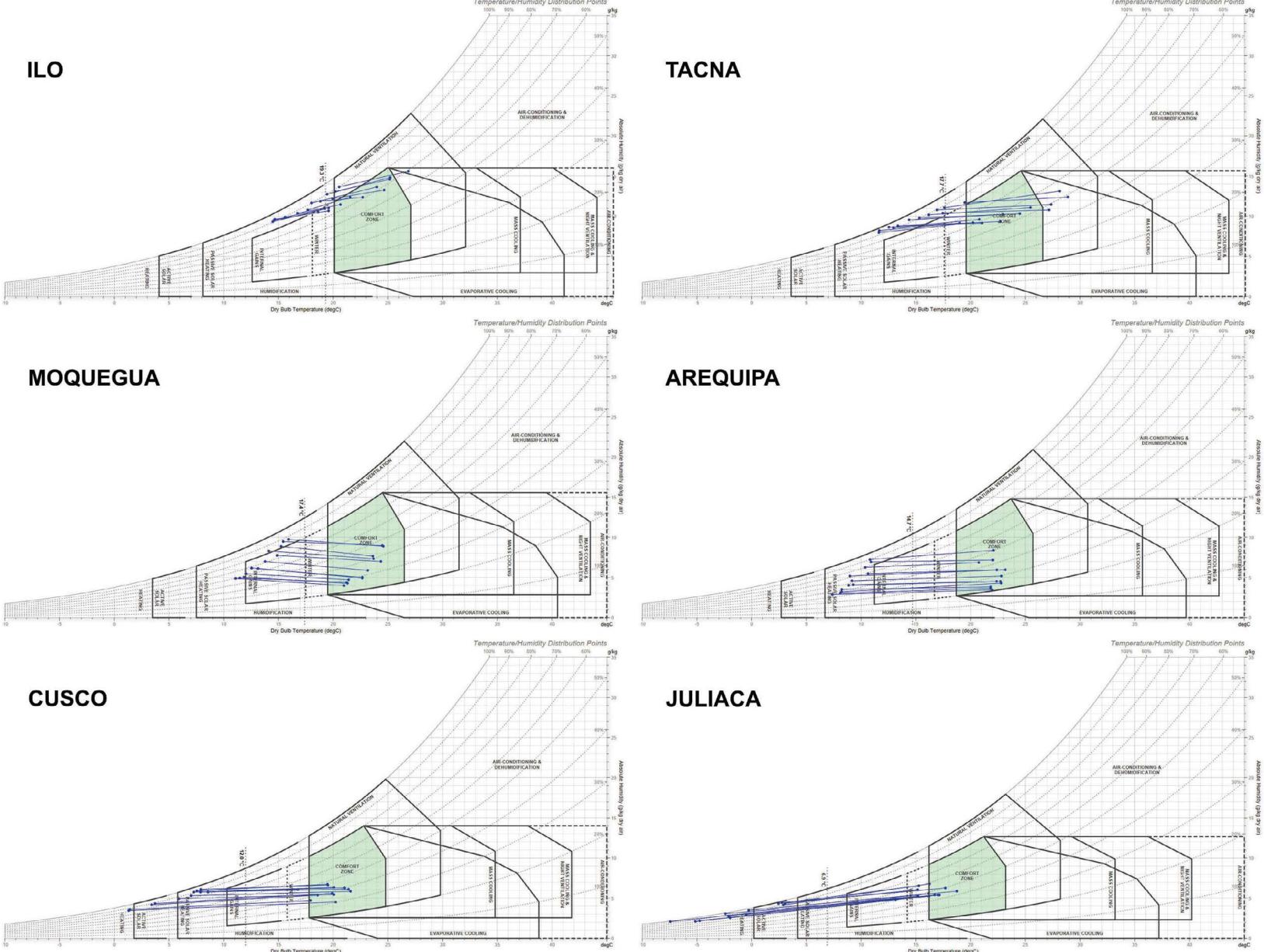
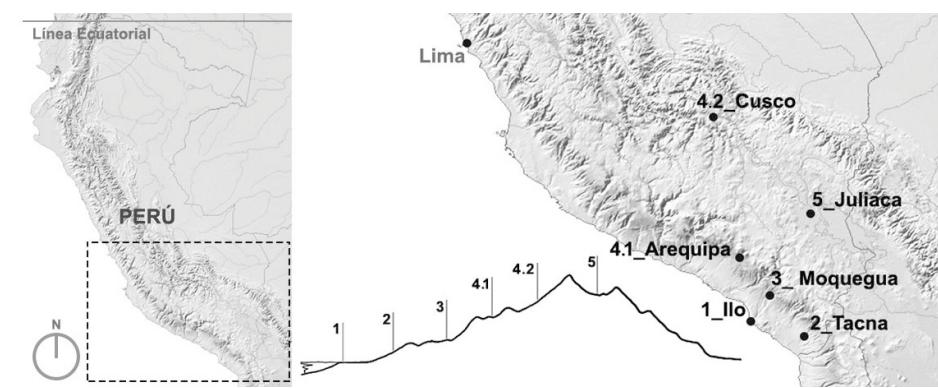
Con base en los datos climáticos obtenidos, se presenta en la figura 2 la representación gráfica, sobre el ábaco psicrométrico, de las temperaturas medias mensuales de cada una de las ciudades

Figura 1. Mapa y corte esquemático del territorio peruano con la ubicación de las ciudades elegidas.

Fuente: elaboración propia (2019). CC BY.

Figura 2. Ábacos psicrométricos con representación de días típicos, zona de confort y estrategias de diseño.

Fuente: elaboración propia a partir del software Psychrometric Chart (2019). CC BY.



Ⓐ Tabla 2. Valores de TE mensual, de TO y de los límites del rango aceptable de temperaturas en cada una de las localidades consideradas.
Fuente: elaboración propia (2019).

Zona climática (localidad)	Mes	TE (°C)	TO (°C)	Rango aceptable de temperatura (°C)	
				Límite inferior	Límite superior
Subtropical litoral (Ilo)	Febrero	23,15	24,80	22,35	27,25
Desértica (Tacna)	Febrero	23,41	24,87	22,42	27,32
Continental templada (Moquegua)	Febrero	19,54	23,88	21,43	26,33
Continental fría_1 (Arequipa)	Agosto	14,58	22,62	19,17	26,07
Continental fría_2 (Cusco)	Agosto	10,52	21,58	18,13	26,07
Continental muy fría (Juliaca)	Agosto	7,71	20,87	17,42	24,32



Ⓐ Figura 3. Vistas del panel experimental con estructura de madera y elementos prefabricados de tierra alivianada.

Fuente: Centro Tierra, PUCP (2019). CC BY

elegidas. Sobre dichos ábacos, confeccionados con el software Psychrometric Chart, desarrollado por Marsh, A. (2019), se superponen la zona de confort y las estrategias de diseño sugeridas por Givoni (1998).

La cercanía existente entre las líneas, en todos los casos, evidencia la poca oscilación térmica estacional que presentan todos los climas, debido a la proximidad de la línea ecuatorial. Así mismo, con excepción de la ciudad de Ilo, debido a su cercanía al mar, se aprecia una oscilación térmica diaria relativamente amplia, con temperaturas que van disminuyendo de manera evidente en la medida de la mayor altitud.

Las estrategias de diseño que sugieren los propios gráficos de la figura 2, indican para los climas más cálidos la necesidad de sombra y ventilación, mientras que para los climas fríos recomiendan tanto el aprovechamiento de las ganancias internas (hermeticidad y aislamiento) como de la ganancia solar de forma pasiva y activa. Cabe mencionar la utilidad de la presencia de materiales con gran masa térmica en climas de gran oscilación diaria de temperaturas, a la que se suma la necesidad del aislamiento para evitar las pérdidas de calor en climas fríos.

Identificación de los límites de confort térmico

Haciendo uso de la fórmula propuesta por De Dear y Brager (1998, p. 14) dentro del marco de la teoría del confort adaptativo, se deduce la temperatura operativa óptima (TO) de confort durante febrero y agosto, asociados a los meses más cálidos y más fríos del año, respectivamente, a partir de los valores de temperatura efectiva

exterior promedio (TE). La fórmula mencionada es la siguiente:

$$= 18,9 + (0,255 \times TE) ^\circ C$$

Para el caso de los climas cálidos y templados, interesa exclusivamente el comportamiento térmico del edificio en verano, mientras que para el caso de los climas fríos, lo que sucede durante el invierno. A partir de la temperatura óptima, se establecen los límites de temperatura interior aceptable para el 90% de los usuarios (TO +/- 2,45 °C) en el caso de los climas cálidos y templados. Debido a la mayor rigurosidad de los climas fríos, y siempre siguiendo los principios del confort adaptativo, los límites en ellos se calculan para satisfacer al 80% de los usuarios (TO +/- 3,45 °C). Todos los valores de temperatura mencionados se presentan en la tabla 2.

Los resultados de los rangos de temperaturas interiores aceptables se utilizarán más adelante para valorar los resultados del desempeño térmico del modelo propuesto.

Propiedades térmicas de la tierra alivianada

En cuanto a las propiedades térmicas necesarias para caracterizar la tierra alivianada, se requirió la identificación de los valores de densidad (kg/m³), de conductividad térmica (W/m-K) y de calor específico (kJ/kg-K) de esta. Las densidades que se utilizarán en el proyecto fueron finalmente elegidas buscando la facilidad y la fiabilidad en la fabricación de los bloques, además de asegurar unas prestaciones térmicas mínimas. Las experiencias previas en proyectos de tierra alivianada (Wieser et al., 2018) permitieron elegir densidades de 600 kg/m³ y de 800 kg/m³, para los techos y los muros, respectivamente. La construcción de paneles experimentales de madera y tierra alivianada, concebidos dentro del marco del proyecto para someterlos a ensayos estructurales, permitió confirmar la idoneidad en la elección de la densidad de los elementos (figura 3).

En relación con los valores de calor específico, estos fueron obtenidos a partir de los datos presentados por Volhard (2016, p. 201), y que, asociados a la propia densidad de las mezclas, indican valores de 1,10 kJ/kg-K, para densidades entre 600 kg/m³ y 1 000 kg/m³.

Respecto a la conductividad térmica, se ha comprobado, igualmente, la existencia de una relación directa muy estrecha entre dicha conductividad y la densidad de las mezclas. Los valores compilados por Volhard (2016, p. 200), tanto de normas como de investigaciones previas, al igual que el estudio específico al respecto realizado por Wieser, Onnis y Meli (2018, p. 205), evidencian dicha relación.

En este último estudio se demostró que, a pesar de las diversas variables que intervienen y de los procedimientos manuales que involucran, es posible predecir con bastante precisión la conductividad térmica de las mezclas de tierra alivianada a partir de una fórmula de interpolación exponencial. Aplicando esa fórmula a las densidades de 600 kg/m³ y 800 kg/m³, los valores de conductividad térmica utilizados en el presente estudio fueron de 0,113 y 0,150 W/m²°C, respectivamente.

Propiedades térmicas de los sistemas constructivos

Los diferentes sistemas constructivos tradicionales en el Perú responden a los climas locales, a la disponibilidad de materiales y a la condición sísmica de las regiones. Es así como existe cierta variedad de soluciones; aquella basada en el muro de adobe es la más utilizada en casi todas las regiones, salvo en los climas tropicales de la selva y la costa norte, cálidos y húmedos, y en los que se utiliza, generalmente, la madera. Al adobe se le suman la quincha (entramado de cañas recubiertas con barro) en las zonas costeras cercanas al litoral, el tapial, generalmente en zonas más altas y frías, y la piedra, en las regiones más frías de la puna.

Pero desde hace unas décadas, principalmente en las ciudades, y cada vez más rápido, se están incorporando materiales industrializados, como el ladrillo cocido, las bloquetas de concreto y la calamina metálica. Se construye prácticamente de la misma forma en la puna fría, en el desierto

cálido-seco y en la llanura amazónica cálido-húmeda: con muros delgados de ladrillo hueco y grandes superficies traslúcidas. La mayor ligereza de las construcciones, sin la adición de capas aislantes y sin el nivel de hermeticidad apropiado, está generando serios problemas de confort térmico y crecientes gastos de energía en la medida en que condicionan un mayor uso de sistemas artificiales de control ambiental (aire acondicionado y calefacción).

Considerando los valores previamente obtenidos de la tierra alivianada, en la tabla 3 se presentan las propiedades térmicas de los diferentes materiales que conforman los muros y los techos que serán considerados en los cálculos posteriores. Los valores aproximados han sido obtenidos de Szokolay (2012) y de la CIBSE⁹ (2015).

A partir de las características presentadas de los materiales, se calcularán en el siguiente título tanto los valores de inercia y de transmitancia térmica de los componentes como el desempeño térmico dinámico de cuatro propuestas constructivas. Dichas propuestas, que se analizarán de manera comparativa en las cinco zonas climáticas descritas, son las siguientes: a) edificio con muros de ladrillo hueco dispuesto de soga y techo de losa aligerada, y que es la solución más recurrente de las últimas décadas; b) edificio con muros de adobe y techos con torta de barro, alternativa cada vez menos usada, aunque aún vigente en las zonas rurales del país, y (c.1 y c.2) dos alternativas de estructura de tierra alivianada en muros y techos. Las propuestas se encuentran mejor detalladas en la tabla 4.

Se indican a continuación algunas consideraciones constructivas importantes adicionales que se tomarán en cuenta para la valoración posterior de los modelos evaluados.

⁹ The Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE). <https://www.cibse.org/>

Tabla 3. Características y especificaciones térmicas de los materiales involucrados. Fuente: elaboración propia (2019).

Componente	Material	Conductividad térmica, λ (W/m-K)	Densidad, (kg/m ³)	Calor específico, (kJ/kg-K)
Muros	Ladrillo hueco (tipo "King Kong")	0,470	1045	0,80
	Enlucido de cemento-arena	0,720	1860	1,20
	Adobe, densidad 1750	0,567	1750	1,00
	Enlucido de tierra interior/exterior	0,804	2000	1,00
	Tierra alivianada, densidad 800	0,150	800	1,10
Techos	Ladrillo pastelero	0,440	1200	0,80
	Concreto de mezcla pobre	1,130	1800	1,00
	Concreto armado (CA)	1,630	2300	1,00
	Ladrillo de techo (LT)	0,440	720	0,80
	Techo de CA (10 cm) + LT (30 cm)	0,738	1115	0,85
	Enlucido de yeso	0,510	1120	0,95
	Torta de barro, densidad 1750	0,567	1750	1,00
	Entablado de madera	0,140	600	1,20
	Tierra alivianada, densidad 600	0,113	600	1,10

En primer lugar, para el caso de los techos de los edificios ubicados en las zonas más cálidas (subtropical, desértica y continental templada), se considerará una cobertura final contra las lluvias que, bien sea de teja, de calamina o, incluso, de paneles fotovoltaicos, estará colocada sobre las propuestas presentadas, con una cámara de aire ventilada y ligeramente inclinada (figura 4; ver detalle en el corte y la perspectiva). Dicha cobertura no influirá sobre los cálculos de transmitancia, pero sí en los cálculos dinámicos de simulación, al generar sombra durante el día sobre el techo inferior. Para el caso de las zonas más frías (continental fría y continental muy fría), se prescindirá de dicha cobertura adicional, para permitir que el techo reciba la radiación.

En segundo lugar, los muros de tierra alivianada cuentan con una estructura de pies derechos y travesaños de madera. Debido a que los valores de conductividad térmica y de densidad de la madera son prácticamente los mismos que los de la tierra alivianada (tabla 3), además de representar un porcentaje mínimo del área total, se considerará el muro de material uniforme, sin puentes térmicos.

En todos los casos se considerará un piso de losa de concreto con un entablado de madera como superficie final. Solo en los casos de los 2 climas fríos, se considerará un aislamiento adicional mínimo equivalente a 10 cm de bloques de tierra alivianada de 600 kg/m³ de densidad, que representa un valor de resistencia térmica aproximada de 0,885 m²°C/W.

Por otra parte, los vanos de ventana, en todos los casos, tendrán acabados de vidrio simple y marco de madera, mientras que la puerta planteada hacia el exterior será de madera contraplacada; se adicionará una capa de aislamiento en el interior en el caso de los climas fríos.

Características del prototipo

Las características formales del prototipo para simular corresponden a las que serán consideradas en la construcción de este, dentro del marco del proyecto, y a escala real, dentro del campus de la universidad. Es un pequeño edificio que contiene un espacio cerrado, además de un baño y una zona de terraza. Sobrepuerto a una losa de cimentación de concreto, el ambiente por evaluar térmicamente será solo el espacio cerrado, al cual en adelante se denominará *el módulo*. Este tiene una planta cuadrangular, un área de aproximadamente 14 m² y una altura interior de 2,5 m.

Se presentan a continuación la planta, el corte y la elevación del prototipo propuesto, así como una vista en perspectiva de este, generada por el software Design Builder (figura 4).

A pesar de que el prototipo no se trata específicamente de una vivienda, se le asignará un uso continuo, tanto diurno como nocturno, con presencia de dos usuarios en el interior del módulo ($\approx 0,14$ personas/m²) desarrollando actividades sedentarias. La presencia de artefactos eléctricos y el régimen de iluminación artificial también coincidirán con un espacio de uso doméstico.

En la medida en que el módulo prescinde de sistemas de climatización artificial, es necesario que este se adapte de forma pasiva a los diferentes tipos de clima. En tal sentido, junto con la variante del doble techo ventilado, ya mencionada, se considerarán diferentes soluciones en la orientación de los vanos para efectos de protección o captación solar, además de ciertas particularidades en el régimen de ventilación natural. Las estrategias consideradas son bastante genéricas y alineadas a las presentadas previamente sobre los ábacos psicrométricos, siguiendo las pautas que propone Givoni (1998).

Tabla 4. Características y especificaciones de los modelos para analizar térmicamente.

Fuente: elaboración propia (2019).

Edificio/componente	Muro	Techo
a. Ladrillo		
	Muro de ladrillo con perforaciones (%) tipo "King Kong", dispuesto de soga (e = 12,5 cm) con tarajeo de cemento-arena a ambos lados (e = 1,25 cm). Espesor total: 15 cm.	Techo aligerado: ladrillo cerámico pastelero (e = 3 cm) sobre losa de concreto (e = 5 cm) con viguetas de concreto armado (h = 12cm, @40 cm) y ladrillos huecos cerámicos de 30 x 30 x 12 cm. Espesor total: 23 cm.
b. Adobe		
	Muros con bloques de adobe de 40 x 20 x 10 cm con enlucidos de tierra en el interior y el exterior (e = 1 cm). Espesor total: 42 cm.	Techo estructurado con viguetas de madera. Torta de barro (e = 10 cm) y entablado de madera (e = 1,25 cm) en la parte inferior. Espesor total: 11,25 cm.
c.1. Tierra alivianada/12 cm		
	Muros con estructura de pie derechos de madera y cerramiento de tierra alivianada de 800 kg/m ³ de densidad (e = 10 cm) con enlucidos de tierra (e = 1 cm) a ambos lados. Espesor total: 12 cm.	Torta de barro (tierra alivianada; densidad: 600 kg/m ³ ; e = 12 cm) sobre entablado (e = 1,25 cm) y viguetas de madera. Espesor total: 13,25 cm.
c.2. Tierra alivianada/22 cm	Igual que c.1, pero con espesor de muro de 20 + 2 cm.	Igual que c.1.

Para asegurar niveles óptimos de iluminación natural, se considera en todos los casos que el área translúcida útil de los vanos equivale al 15% del área del piso. Para el caso de los climas más cálidos, los vanos se ubicarán en las caras norte y sur, lo que asegura una buena ventilación, debido a la dirección de los vientos, y evita la incidencia solar directa sobre los vanos. A partir del clima continental templado, se prescinde del vano orientado hacia el sur y se lo pone en la cara este, lo que permite la ganancia solar en horas de la mañana. Finalmente, en los climas más fríos se concibe una claraboya de área equivalente en el centro del techo, para una mayor ganancia solar directa, de tal forma que compense la rigurosidad climática del emplazamiento. En estos últimos casos, se consideran, adicionalmente, unas contraventanas con aislamiento, que permanecerán cerradas durante las horas de la noche. En la tabla 5 se resumen de manera gráfica las variantes de doble techo ventilado y de la orientación de los vanos en función de los tipos de clima, según lo indicado en los párrafos previos.

En la medida en que está asegurada la operatividad de las ventanas, y debido a la ausencia de equipos de climatización artificial, la ventilación natural se acomodará en cada clima en función de la conveniencia de los usuarios. En los climas más cálidos, se permitirá la ventilación cuando el exterior esté más fresco que el interior y las temperaturas interiores salgan de la zona de confort. En los climas más fríos la ventilación estará limitada al mínimo requerido, permitiendo únicamente una infiltración que asegure una renovación de un cambio de aire por hora.

Transmitancia e inercia térmicas de los cerramientos

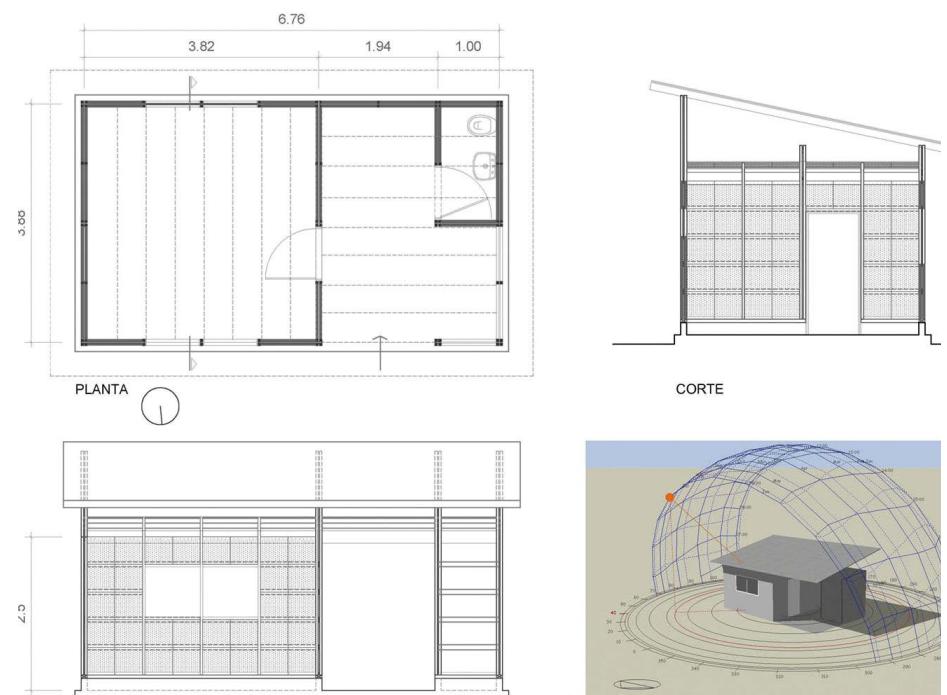
En una primera instancia, para identificar la capacidad de aislamiento de la envolvente, se calcula el valor de transmitancia térmica (Valor-U) de las distintas soluciones presentadas. Este valor resulta útil, ya que es de uso frecuente en normati-

vas, pero cabe reconocer que ello responde más a una preocupación de ahorro de energía por el uso de sistemas artificiales. Adicionalmente, se identifica la inercia térmica de los elementos a partir de los valores de factor de decremento (*Decrement Factor*, en inglés) y tiempo de retardo (*Time Lag*, en inglés). Esta información es relevante, sobre todo, en edificios sin sistemas artificiales de climatización y en climas de gran oscilación térmica diaria, que, salvo la costa litoral, tienen en la inercia térmica de la envolvente una de sus principales estrategias de control ambiental.

La inercia térmica de un componente permite tener una idea de su capacidad para amortiguar y retardar el paso del calor desde y hacia el exterior del edificio. El tiempo de retardo indica el número de horas que el calor requiere para conducirse a través del elemento entre una cara y la otra; este valor ayuda a identificar el potencial de un componente en la medida en que puede retrasar, si el valor es sustancialmente alto, el paso del calor en los momentos más cálidos del

Figura 4. Planta, corte y elevación esquemáticos del prototipo y vista en perspectiva.

Fuente: elaboración propia (2019). CC BY



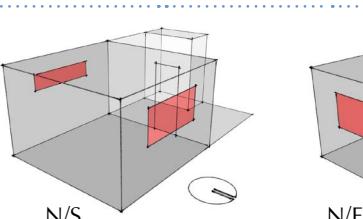
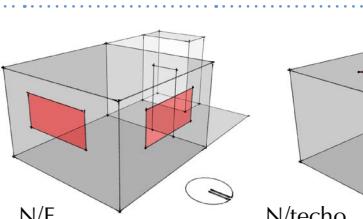
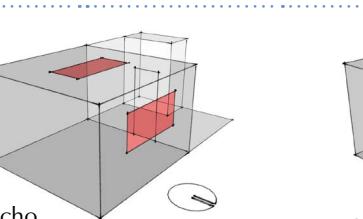
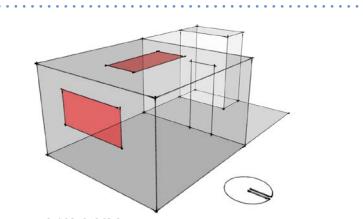
Zona climática	Subtropical litoral	Desértica	Continental templada	Continental fría_1	Continental fría_2	Continental muy fría
Localidad	Illo	Tacna	Moquegua	Arequipa	Cusco	Juliaca
Cubierta						
Con aislamiento térmico ventilado						
Posición / orientación de vanos		   				

Tabla 5. Variantes de diseño de cubierta y vanos en el módulo, según zona climática.

Fuente: elaboración propia (2019).

► Tabla 6. Valores de transmitancia térmica, factor de decremento y tiempo de retardo de los componentes de la envolvente de los modelos por simular.

Fuente: elaboración propia, a partir de la utilización del software Opaque 3.0 (2019).

Componente/valores	Transmitancia térmica (W/m ² °C)	Factor de decremento	Tiempo de retardo (horas)
Muros			
a. Muro de Ladrillo, e=15 cm	2,170	0,82	3,63
b. Muro de Adobe, e=42 cm	1,123	0,08	7,80
c.1 Muro de Tierra Alivianada, 800kg/m ³ , e=12 cm	1,174	0,78	4,51
c.2 Muro de Tierra Alivianada, 800kg/m ³ , e=22 cm	0,659	0,33	10,13
Techos			
a. Techo aligerado de concreto, e=23 cm	2,005	0,48	6,21
b. Techo de torta de barro, e=11.25 cm	2,147	0,74	3,91
c.1. y c.2. Techo de Tierra Alivianada 600kg/m ³ , e=13.25 cm	0,740	0,68	5,31

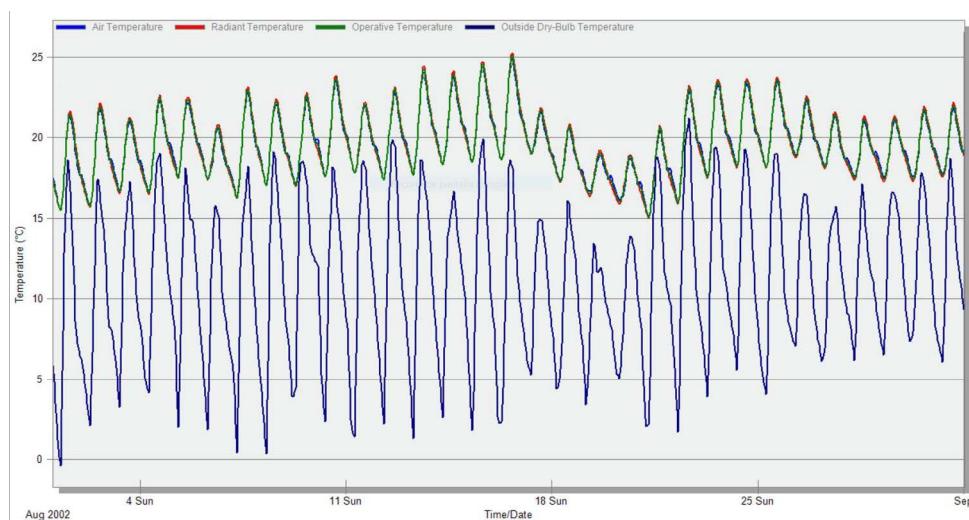


Figura 5. Captura de imagen de resultados para el módulo de adobe, ubicado en la ciudad de Cuzco.

Fuente: elaboración propia, usando Design Builder 4.5 (2019). CC BY.

día y emitirlos durante los momentos más fríos. En el caso específico del factor de decremento, el valor indica la relación entre la diferencia de temperaturas de la superficie interior frente a la diferencia de temperaturas de la superficie exterior. Un valor de 1 implicaría ausencia de masa térmica, mientras que un valor de 0 indicaría que las temperaturas superficiales interiores del elemento se mantienen constantes; seguramente, muy cercanas a la temperatura media exterior. Esta última situación, como ya se adelantó, suele ser muy útil en climas de alta oscilación térmica. Los resultados de las propiedades térmicas indicadas de los componentes se presentan en la tabla 6.

Es importante añadir que la norma peruana vigente sobre ahorro de energía, EM.110 del Reglamento Nacional de Edificaciones (2014), aun siendo de aplicación opcional, establece que el valor de transmitancia térmica en los muros no debe superar los 2,36 W/m²°C en los climas menos rigurosos, ni los 1,00 W/m²°C en la zona altoandina. En los techos, el límite que establece la norma es de 2,20 W/m²°C en las zonas más bajas, y de 0,83 W/m²°C en la zona altoandina. Si bien existe una propuesta de actualización de la norma con valores un poco más exigentes, se puede observar que las soluciones tradicionales y convencionales logran cumplir con los requerimientos únicamente en los climas menos rigurosos.

Simulaciones térmicas dinámicas

Tomando en cuenta las consideraciones y los valores identificados en los títulos previos, en la figura 5 se presentan los resultados de una de las simulaciones térmicas dinámicas hechas con la herramienta informática *Design Builder* y los gráficos que resumen la temperatura interna promedio mensual de cada uno de los módulos, vinculada a la zona de confort identificada previamente considerando el método adaptativo (figura 6; figura 7). Los resultados corresponden a un día típico del mes más cálido para el caso de las localidades cálidas y templadas (Ilo, Tacna y Moquegua), y del mes más frío, para el de las localidades más altas y frías (Arequipa, Cuzco y Juliaca).

Finalmente, mientras que las figuras 6 y 7 muestran un día típico a partir de valores promedio mensuales, en la figura 8 se resumen, en porcentaje de tiempo, las condiciones de confort que se lograron en el interior de cada una de las alternativas constructivas a lo largo del mes crítico (el más cálido o el más frío, según el clima), considerando, nuevamente, la teoría de confort adaptativo.

Discusión

Los resultados obtenidos permiten, en términos generales, evidenciar notables diferencias en el comportamiento térmico de las distintas opciones constructivas analizadas. La identificación previa de la transmitancia y de la inercia térmicas de los componentes de muros y techos hizo prever dichos resultados. Las diferencias fueron más notables en la medida en que la exigencia del clima aumentaba, tanto por la mayor oscilación térmica diaria, debido a la continentalidad del emplazamiento, como por los valores de temperatura de los climas más fríos, debido a la altitud.

A partir de los valores de transmitancia obtenidos, tanto en los muros como en el techo, se confirma el alto grado de aislamiento que se alcanza con los elementos de tierra alivianada; estos son los únicos que logran cumplir con las exigencias de la actual norma peruana de eficiencia energética para el caso de los climas más fríos. Aun cuando es evidente que es posible

cumplir las normas mencionadas a partir de la utilización de elementos aislantes artificiales e industriales, la tierra alivianada lo consigue manteniendo prestaciones de inercia térmica bastante buenos y con las ventajas ecológicas que implica el uso de materiales naturales.

Retomando los resultados de las simulaciones térmicas dinámicas, se puede observar que en los climas cálidos y templados todas las soluciones demostraron un buen comportamiento térmico frente a un día típico de verano. Esto se debe a la baja o moderada oscilación térmica y a unas temperaturas exteriores relativamente cercanas a la zona de confort. Esa condición se logró, igualmente, debido a la consideración de dos estrategias bioclimáticas fundamentales para este tipo de climas: la ventilación cruzada a demanda, que se consigue gracias a la operatividad de los vanos, y la protección efectiva de la radiación solar, debido a la orientación de las aberturas y a la disposición del doble techo ventilado.

Mientras que en las soluciones de envolvente con gran inercia térmica, como el adobe y la tierra alivianada gruesa, la condición de confort es plena y a toda hora en días particularmente cálidos, las soluciones ligeras presentan situaciones de desconfort por exceso de calor, aunque ello no deja de ser una condición poco recurrente. Cabe reconocer, en cualquiera de los casos, el papel del techo en el comportamiento térmico general, donde se destacan el alto nivel de inercia que tiene el techo aligerado en la construcción con ladrillo y el alto nivel de aislamiento de la cobertura de tierra alivianada.

En la medida en que los climas son más fríos, los materiales ligeros evidencian serias limitaciones a la hora de mantener el confort en horas de la noche y la madrugada. Es significativamente notorio lo que ocurre con la construcción de ladrillo, con casi la mitad del tiempo en situación de desconfort para el caso de la ciudad de Juliaca, la más alta y fría incluida en el presente trabajo. A pesar de contar con recursos pasivos para elevar la temperatura interior, esta termina muy por debajo de los límites mínimos requeridos. En relación con la solución de muros de tierra alivia-

nada de 12 cm, aun comportándose mejor que el ladrillo, esta resulta también insuficiente. En ambos casos, la causa principal es el bajo nivel de aislamiento que provee la envolvente.

Llama la atención el desempeño del módulo de adobe: aunque no presenta temperaturas tan bajas como las del módulo de ladrillo, la sensación de frío en el interior es una condición que ocurre muy a menudo: aproximadamente, la tercera parte del tiempo. Aun contando con una claraboya y un nivel de hermeticidad relativamente alto,

Figura 6. Temperaturas exterior e interiores de cada módulo en las localidades cálidas y la templada.

Fuente: elaboración propia (2019). CC BY.

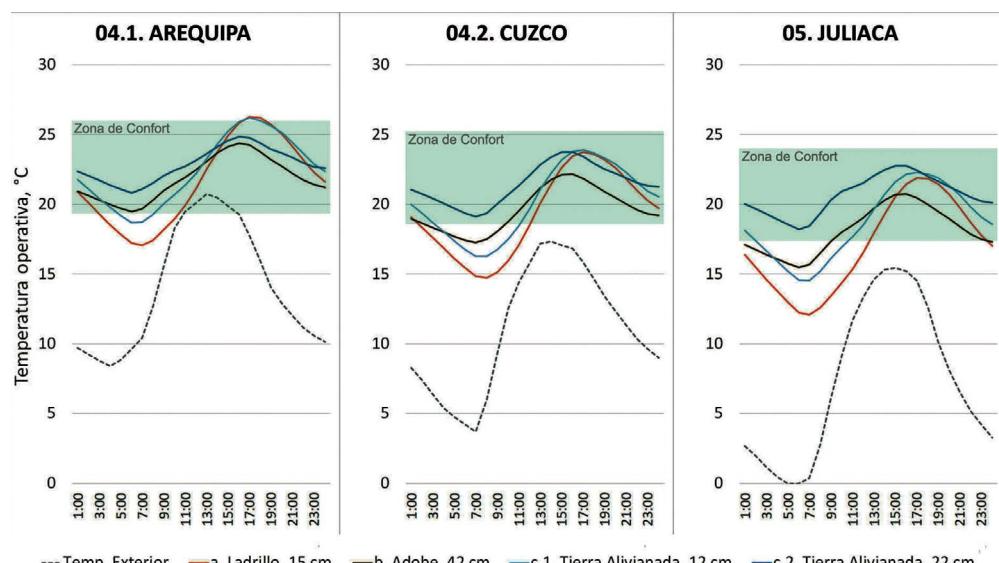
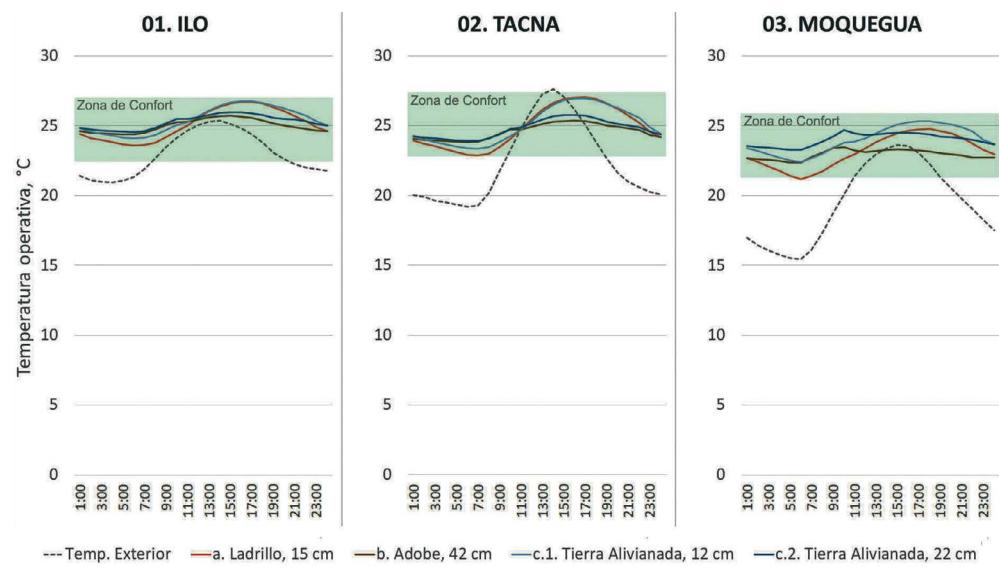


Figura 7. Temperaturas exterior e interiores de cada módulo en localidades frías.

Fuente: elaboración propia (2019). CC BY.

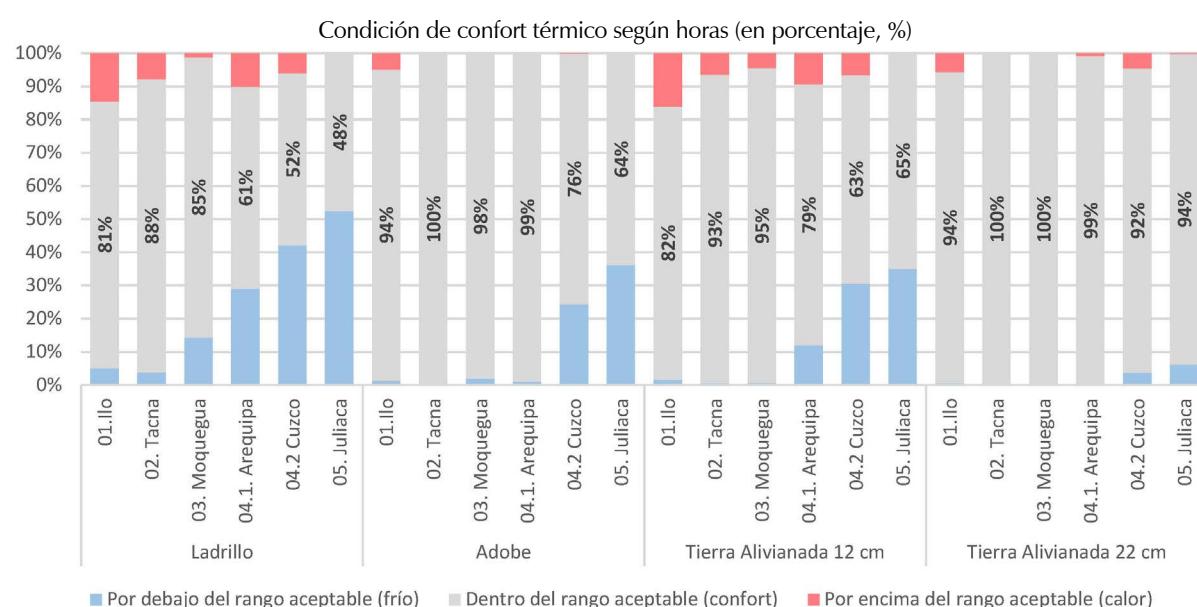


Figura 8. Resultados comparativos de las cuatro soluciones constructivas.

Fuente: elaboración propia (2019). CC BY.

el gran espesor del muro no termina de lograr un nivel óptimo de aislamiento térmico, con resultados por debajo de las expectativas que este material suele ostentar.

La única solución que logra un buen desempeño térmico en el interior del módulo es la versión de muro grueso de tierra alivianada (espesor igual a 22 cm). Con esta condición la temperatura interior, incluso en el clima más frío, se mantiene todo el tiempo en la zona de confort durante un día típico de invierno. Al igual que el adobe, se evidencia la capacidad para amortiguar las condiciones exteriores, debido a la masa que posee; pero la mayor capacidad de aislamiento de la tierra alivianada permite mantener más alta la temperatura todo el día.

Conclusiones

Las propiedades térmicas identificadas de las diferentes soluciones constructivas analizadas, además de las temperaturas obtenidas en las simulaciones dinámicas del módulo, permiten reconocer que la tierra alivianada, concebida como elemento que conforma la envolvente del edificio, se presenta como una alternativa válida y con un enorme potencial desde el punto de vista del desempeño térmico. Los resultados han sido satisfactorios y superiores a las demás soluciones en todos los climas considerados; sobre todo, en los más exigentes.

Las virtudes de la tierra alivianada, desde el punto de vista del desempeño térmico, se explican a partir del marcado equilibrio entre una masa térmica media y una conductividad térmica relativamente baja, condición poco común en elementos constructivos tradicionales y contemporáneos. A dicha condición se le suma la ventaja de estar

compuesta de materiales naturales, renovables y biodegradables, todo lo cual la presenta como una alternativa constructiva con mucho potencial.

Motivos muy diversos hacen que las construcciones de ladrillo sean en la actualidad las más recurrentes en el país, en todos los ámbitos climáticos y para toda clase de edificios. Es importante reconocer el pobre desempeño térmico de este tipo de construcciones; sobre todo, en los climas más fríos y exigentes. En la medida en que se prescinde de capas adicionales de aislamiento, resulta imposible lograr ambientes interiores mínimamente confortables. Y aun cuando el desempeño térmico de un edificio tradicional de adobe es sensiblemente mejor que el de uno de ladrillo, este resulta también insuficiente en los climas fríos respecto a requerimientos de confort contemporáneos.

Por lo expuesto, resultará útil indagar en futuras investigaciones acerca de la viabilidad constructiva de la concepción de cerramientos de tierra alivianada o de la incorporación de capas adicionales de dicho material en los muros y los techos existentes, buscando mejorar el desempeño térmico de los edificios a partir de una solución económica y de bajo impacto en el medio ambiente.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO), al Concejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) y a la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), por el financiamiento que hizo posible el desarrollo de la presente investigación.

Referencias

- Bouillon, C. P. (Ed.), Blanco, A., Fretes, V., Boruchowicz, C., Herrera, K., Medellín, N., Muñoz, A. y Azevedo, V. (2012). *Un espacio para el desarrollo: Los mercados de vivienda en América Latina y el Caribe*. Washington, D.C.: Banco Interamericano de Desarrollo. Recuperado de: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Un-espacio-para-el-desarrollo-Los-mercados-de-vivienda-en-Am%C3%A9rica-Latina-y-el-Caribe.pdf>
- Busbridge, R., & Rhydwen, R. (2010). *An investigation of the thermal properties of hemp and clay monolithic walls*. Proceedings of Advances in Computing and Technology, (AC&T) The School of Computing and Technology 5th Annual Conference, University of East London, pp. 163-170. Recuperado de: <https://repository.uel.ac.uk/item/862v9>
- CIBSE, G. A. (2015). *Guide A: Environmental design*. London: Chartered Institution of Building Services Engineers CIBSE.
- Climate.OneBuilding.Org (2019). Repository of free climate data for building performance simulation. Recuperado de: <http://climate.onebuilding.org/>
- De Dear, R., y Brager, G. S. (1998). Developing an adaptive model of thermal comfort and
- preference. *JournalASHRAE Transactions*. 104(1), 145-167. Recuperado de: <https://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6>
- Givoni, B. (1998). *Climate considerations in building and urban design*. New York: John Wiley & Sons.
- Instituto Geofísico del Perú (2018). *El Clima en el Perú. Ministerio del Ambiente*. Recuperado de: <http://www.met.igp.gob.pe/clima/>
- Marsh, A. (2019). *Psychrometric Chart*. Software en línea. Recuperado de: <http://andrewmarsh.com/software/psychrochart-web/>
- Reglamento Nacional de Edificaciones (2014). *Norma EM.110 Confort térmico y lumínico con eficiencia energética*. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú. Recuperado de: http://cdn-web.construccion.org/normas/rne2012/rne2006/files/titulo3/04_EM/DS006-2014_EM.110.pdf
- Szokolay, S. (2012). *Introduction to architectural science*. Great Britain: Routledge. Recuperado de: https://archive.org/details/Introduction_to_Architectural_Science_The_Basis_of_Sustainable_Design
- U.S. Department of Energy (2019). *EnergyPlus Weather Data*. Recuperado de: <https://energyplus.net/weather>
- 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* (pp. 357-367). Singapore: Springer.
- Volhard, F. (2016). *Light earth building. A handbook for building with wood and earth*. Basilea, Suiza: Birkhäuser.
- 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. y Meli, G. (2018). Conductividad térmica de la tierra alivianada con fibras naturales en paneles de quincha. *SIACOT 2018 Tierra, Cultura, hábitat resiliente y desarrollo sostenible, 18º Seminario iberoamericano de arquitectura y construcción en tierra*. Ciudad de La Antigua, Guatemala: Pro Terra. Recuperado de: <http://files.pucp.edu.pe/facultad/arquitectura/2019/11/27173426/2018-SIACOT-Wieser-Onnis-Meli.pdf>

