

ESTRATEGIAS DE SOSTENIBILIDAD ENFOCADAS AL CONFORT TÉRMICO Y LA ENERGIA INCORPORADA DE UNA VIVIENDA EMERGENTE EN LA REGIÓN ANDINA DEL ECUADOR

SUSTAINABILITY STRATEGIES FOCUSED ON THERMAL COMFORT AND EMBODIED ENERGY OF EMERGING HOUSING IN THE ANDEAN REGION OF ECUADOR

ESTRATÉGIAS DE SUSTENTABILIDADE FOCADAS NO CONFORTO TÉRMICO E NA ENERGIA INCORPORADA DE UMA HABITAÇÃO EMERGENTE NA REGIÃO ANDINA DO EQUADOR

Jefferson Torres-Quezada

Escuela de Arquitectura
Universidad Católica de Cuenca, Ecuador
<https://orcid.org/0000-0002-1832-1369>
jefferson.torres@ucacue.edu.ec

Santiago Lituma-Saetama

Investigador independiente, Cuenca, Ecuador
<https://orcid.org/0000-0002-8967-7645>
ssls_94@hotmail.es



RESUMEN

Ante los constantes desastres naturales de regiones andinas de Ecuador, se han planteado varias soluciones habitacionales, sin embargo, estas no consideran el confort térmico del usuario ni el impacto ambiental que generan. Esta investigación aborda esta problemática desde una perspectiva bioclimática a través de un modelo de vivienda emergente en un clima andino orientado a asegurar el confort térmico y reducir el impacto ambiental de la construcción. El análisis se enfoca en la temperatura interior y la Energía Incorporada Total (EI_T) del modelo de vivienda. La metodología se divide en la definición del modelo y las estrategias, por un lado y, por el otro, el análisis de estos parámetros a través de simulaciones y cálculos. Además, se realiza un análisis comparativo con otros estudios. Las estrategias definidas fueron la captación solar, masa térmica, compacidad, materiales locales-reciclados y la modulación. Los resultados muestran que el modelo planteado alcanza, de manera pasiva, las temperaturas de confort y la EI_T (2135.38 MJ/m²) es menor que la de otras viviendas de carácter social.

Palabras clave

masa térmica, habitabilidad, eco-arquitectura

ABSTRACT

Faced with the constant natural disasters in the Andean regions of Ecuador, several housing solutions have been proposed. However, these do not consider the user's thermal comfort or the environmental impact they generate. This research addresses this issue from a bioclimatic perspective through an emerging housing model in an Andean climate, oriented to ensuring thermal comfort and reducing the environmental impact of the construction. The analysis focuses on indoor temperature and the Total Embodied Energy (EE_T) of the housing model. The methodology is divided into the definition of the model and strategies, on one hand, and, on the other, the analysis of these parameters through simulations and calculations. In addition, a comparative analysis with other studies is carried out. The strategies defined were solar gain, thermal mass, compactness, local-recycled materials, and modulation. The results show that the proposed model passively reaches comfort temperatures, and that the EE_T (2135.38 MJ/m²) is lower than that of other social housing.

Keywords

thermal mass, habitability, eco-architecture

RESUMO

Diante dos constantes desastres naturais nas regiões andinas do Equador, várias soluções habitacionais foram propostas, mas elas não consideram o conforto térmico do usuário nem o impacto ambiental que geram. Esta pesquisa aborda esse problema a partir de uma perspectiva bioclimática por meio de um modelo de habitação emergente em um clima andino que visa garantir o conforto térmico e reduzir o impacto ambiental da construção. A análise se concentra na temperatura interna e na energia total incorporada (EI_T) do modelo de habitação. A metodologia é dividida, por um lado, na definição do modelo e das estratégias e, por outro, na análise desses parâmetros por meio de simulações e cálculos. Além disso, é realizada uma análise comparativa com outros estudos. As estratégias definidas foram ganho solar, massa térmica, compacidade, materiais reciclados localmente e modulação. Os resultados mostram que o modelo proposto atinge passivamente temperaturas de conforto e o EI_T (2135,38 MJ/m²) é menor do que o de outras habitações sociais.

Palavras-chave

masa térmica, habitabilidade, ecoarquitetura.

INTRODUCCIÓN

Los desastres naturales son una problemática incontrolable alrededor del mundo y han tenido un gran impacto en el ámbito social, económico y, por supuesto, en el medio construido. A partir de este contexto nace la Vivienda Emergente (VE), definida como una solución habitacional rápida y transitoria para solventar las necesidades de cobijo de personas damnificadas (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2018). Una de las zonas con el mayor índice de desastres naturales es la región interandina de Sudamérica, debido principalmente a aspectos geológicos y precipitaciones extremas (Marocco & Winter, 1997).

En la región Andina del Ecuador se han registrado numerosos desastres naturales en las últimas décadas. En 1993, el deslizamiento de la montaña Josefina-Azuay dejó 100 fallecidos, 5631 afectados y 1800 hectáreas de tierra agropecuaria destruida (Zevallos, 1994). En 1999, la erupción del volcán Pichincha provocó el desplazamiento de 2000 personas y contaminó el aire 200 km a la redonda (Álvarez & Avilés, 2012). La catástrofe más reciente fue el deslizamiento de tierra en Alausí-Chimborazo en marzo de 2023, el cual registró 32 personas fallecidas, 163 viviendas afectadas, 1034 personas damnificadas, 2.32 km de vías destruidas y 26ha de superficie agrícola afectadas (Dirección de Monitoreo de Eventos Adversos, 2023).

Ante estas necesidades, distintas propuestas han sido planteadas principalmente a solventar requerimientos espaciales. No obstante, la situación post-desastre demanda mucho más que un enfoque espacial, siendo una de las insuficiencias más importantes la de la Vivienda Emergente (en adelante, VE), pues es la protección que tienen las personas ante las inclemencias climáticas (Espinosa & Cortés, 2015).

En el clima de esta región, cuyas temperaturas mínimas fluctúan por debajo de 9°Cel (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de la República del Ecuador [INAMHI], 2017), dar solución a esta problemática térmica de la vivienda supone un gran desafío, puesto que se deben considerar también dificultades de bienestar físico-mental (Hughes et al., 2019), demanda energética (Andersen et al., 2017), y salud de sus ocupantes (Fonseca-Rodríguez et al., 2021). Esto hace que las soluciones habitacionales de VE deban tomar en consideración estrategias para solventar el desconfort térmico.

Varias instituciones han liderado proyectos de VE a través de prototipos que priorizan la facilidad de construcción (TECHO, 2020) por ser soluciones transitorias. Por esta razón, para su construcción optan por materiales livianos como tableros de aglomerados de madera y techos de zinc, los que no resuelven las carencias de confort interior en este clima. Además, estos prototipos se enfocan en

dar una solución habitacional transitoria, no obstante, en la mayor parte de los casos los damnificados lo han convertido en una vivienda permanente.

La recuperación de los damnificados después de un desastre natural es un proceso complejo que comienza desde la integración a un nuevo núcleo social hasta encontrar un terreno o edificación en donde construir o arrendar y, por supuesto, reestablecer su situación económica. Esto hace que, muchas veces, se vean obligados a convertir sus viviendas emergentes en permanentes (Lines et al., 2022).

Los prototipos de VE que consideran el aspecto térmico en su diseño y construcción se han implementado en varios países, sin embargo, estos no son completamente sostenibles, ya que muchos modelos se enfocan en el uso de calefacción y aislamiento para reducir las pérdidas en climas fríos y, en consecuencia, reducir la demanda operacional (Thonipara et al., 2019).

En relación con lo anterior, Hong (2016) plantea un prototipo de VE en Corea hecho de contenedores metálicos con aislamiento en paredes y techo y calefacción. Por su parte, Sinohara et al. (2014) analiza el confort térmico en tres tipos de VE en Japón con un factor-U bajo, los que, en invierno alcanzan una temperatura promedio entre 11-14°C. Esto responde a que no tienen un uso constante de calefacción por el alto costo que supone.

La reducción del factor-U de la envolvente es una estrategia y normativa globalizada para conseguir una vivienda sostenible (Gullbrekken et al., 2019). No obstante, otros estudios demuestran que la eficacia del aislamiento depende del contexto climático (Curado & Freitas, 2019) y puede ser reemplazado por la captación solar y la masa térmica (Santana Oliveira et al., 2022).

Aunque el uso de materiales aislantes en estos prototipos pueda asegurar el confort de los espacios, implica a su vez un alto impacto ambiental debido al elevado consumo de Energía Incorporada que estos suponen (Torres-Quezada et al., 2022). En cuanto al uso de materiales, el poliestireno expandido significa 127 MJ/kg (Azari & Abbasabadi, 2018), mientras que el ladrillo supone 2.52 MJ/kg (González Stumpf et al., 2014). En términos de vivienda, edificaciones con altos estándares de aislamiento, como el caso de Suecia, tienen una Energía Incorporada total (E_I) de 5530 MJ/m² (Thormark, 2002) y en Holanda, 6400 MJ/m² (Koezjakov et al., 2018). En Ecuador, por su parte, viviendas unifamiliares comunes tienen una E_I de 3600 MJ/m² (Torres-Quezada et al., 2022).

La preocupación por asegurar la habitabilidad de las VE en términos de confort térmico ha sido abordada en varios estudios alrededor del mundo, sin embargo, las investigaciones son escasas en climas andinos. Además, es necesario reflexionar que el tiempo de estancia que

tiene un damnificado en una VE varía de 0.5-5 años (Hong, 2016) y en muchos casos estas se convierten en viviendas permanentes (Lines et al., 2022).

Por tanto, este estudio aborda el déficit habitacional debido a desastres naturales desde una perspectiva sostenible, considerando las condiciones térmicas a través de estrategias pasivas y las repercusiones ambientales que supone su construcción. El objetivo se centra en evaluar el impacto de las estrategias pasivas aplicadas a un modelo de VE de tipo transitorio-permanente sobre la temperatura interior y la Energía Incorporada en una ciudad de la zona andina ecuatoriana.

METODOLOGÍA

La metodología aborda dos fases. En la primera, se definen las estrategias pasivas y el modelo a estudiarse. En la segunda, se realiza el análisis del desempeño térmico y del impacto ambiental de la propuesta a través del uso de simulaciones digitales y del Cálculo de la EI, respectivamente. Se ha tomado como caso de estudio la ciudad de Ambato, ubicada en la región Andina del Ecuador a una altitud de 2580 msnm (Figura 1).

La elección de esta ciudad se respalda, por un lado, porque su clima es característico de la región Andina del Ecuador, con bajas temperaturas, altas oscilaciones térmicas y una precipitación moderada (Figura 2). Por otro, su ubicación geográfica está en una zona bastante expuesta a desastres naturales (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2018).

ESTRATEGIAS Y MODELO

En esta fase se han definido las estrategias pasivas en función del ábaco psicrométrico de Givoni (1969) (Figura 3), el cual ha sido utilizado en estudios previos para determinar estrategias bioclimáticas en otras regiones (Da Casa Martín et al., 2019). Para este análisis se ha utilizado el software Climate Consultant 6.0.15 (Climate Consultant, 2020) El archivo climático (EPW) utilizado en este software, y para las posteriores simulaciones térmicas, se obtuvo de climate.onebuilding.org (2020).

De acuerdo con esta información, Ambato permanece en disconfort térmico en la mayoría de las horas del año (8048), y solo el 8,1% de las horas anuales en confort. Los lineamientos más importantes que se definen son las ganancias internas, la calefacción y humidificación, ganancias directas solares y alta masa térmica.

En base a las estrategias, la bibliografía sobre la aplicación pasiva de las mismas demuestra que el uso del aislamiento para reducir las pérdidas de calor es la que tiene mayor promoción (Iwata et al., 2023). La estrategia que le sigue en importancia es el uso de la



Figura 1: Ubicación de la ciudad de Ambato, zona andina de Ecuador. Fuente: Elaboración de los autores

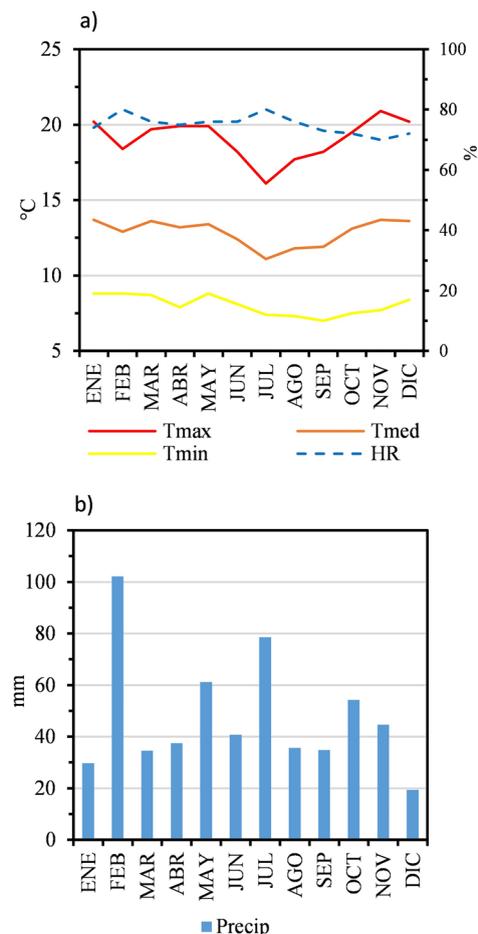


Figura 2: a) Humedad relativa (HR); Temperatura máxima (Tmax), media (Tm) y mínima (Tmin) promedio mensual y b) precipitación mensual de Ambato. Fuente: Elaboración de los autores a partir de datos obtenidos de INAMHI (2017)

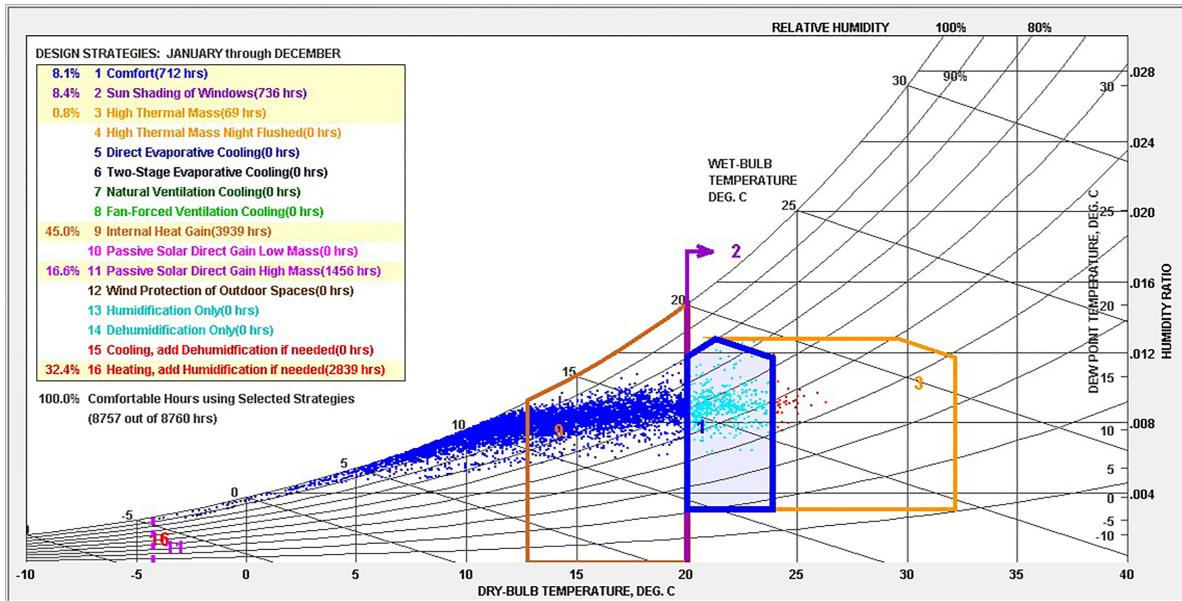


Figura 3: Ábaco psicrométrico de Givoni (1969) del clima de Ambato. Fuente: Elaboración de los autores en software Climate Consultant (2020)

Tabla 1: Estrategias del modelo de VE. Fuente: Elaboración de los autores

Estrategia	Descripción
Ganancias internas	La distribución interna prioriza espacios conjuntos para aprovechar el calor por cocción, usuarios e iluminación.
Aportes solares	Los vanos se orientan a este y oeste con porcentaje de apertura del 30%, lo que permite captar radiación solar en el día y controlar las pérdidas de calor en la noche.
Masa térmica	Muros este y oeste con alta masa térmica
Aislamiento	Cámara de aire en paredes norte y sur, en cubierta y piso.
Orientación	Fachadas más largas hacia este y oeste.
Compacidad	Las viviendas se agrupan en pares para reducir la superficie de contacto con el exterior.
Infiltraciones	Menor cantidad de vanos en la envolvente.

cámara de aire para reducir la transmitancia térmica de la envolvente (O’Hegarty et al., 2021). Cabe destacar que este estudio se enfoca en la minimizar el uso de materiales de aislamiento para disminuir el impacto ambiental.

En cuanto a las ganancias internas y a la calefacción, la bibliografía destaca los aportes hechos por personas y equipos (Zhou et al., 2019). Por último, Curado & Freitas (2019) plantean las ganancias solares como estrategia fundamental para aportes directos e indirectos. Adicional a las estrategias dadas por el ábaco de Givoni (1969), se destaca la aplicación de un intercambiador de calor aire-tierra, denominado el muro trombe o el muro verde (Dabaieh & Serageldin, 2020).

La única estrategia utilizada para este estudio fue la

compacidad (García Mitjans, 2022), dado que las otras suponen una inversión y mantenimiento muy alto. Todas estas estrategias se resumen en la Tabla 1.

A continuación, se investigó sobre los materiales de bajo impacto ambiental y los sistemas constructivos vernáculos más representativos en esta región. Torres-Quezada & Torres-Avilés (2023a) determinaron que el hormigón y el metal son los materiales de la región Andina con mayor impacto en la energía incorporada total de la vivienda en las últimas 4 décadas. Además, este estudio evidencia que los materiales de acabados como enlucido de cemento, porcelanato, madera laminada o acero inoxidable, también tienen un alto impacto ambiental. Otro punto importante es que el uso excesivo del vidrio puede llegar a incrementar drásticamente la EI de la vivienda, lo cual,

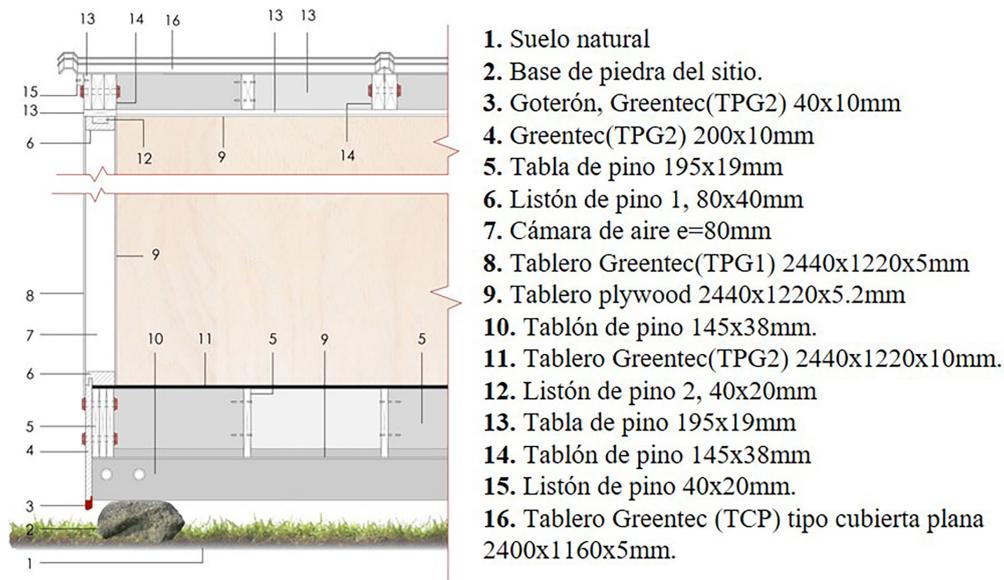


Figura 4: Sección constructiva del modelo. Fuente: Elaboración de los autores

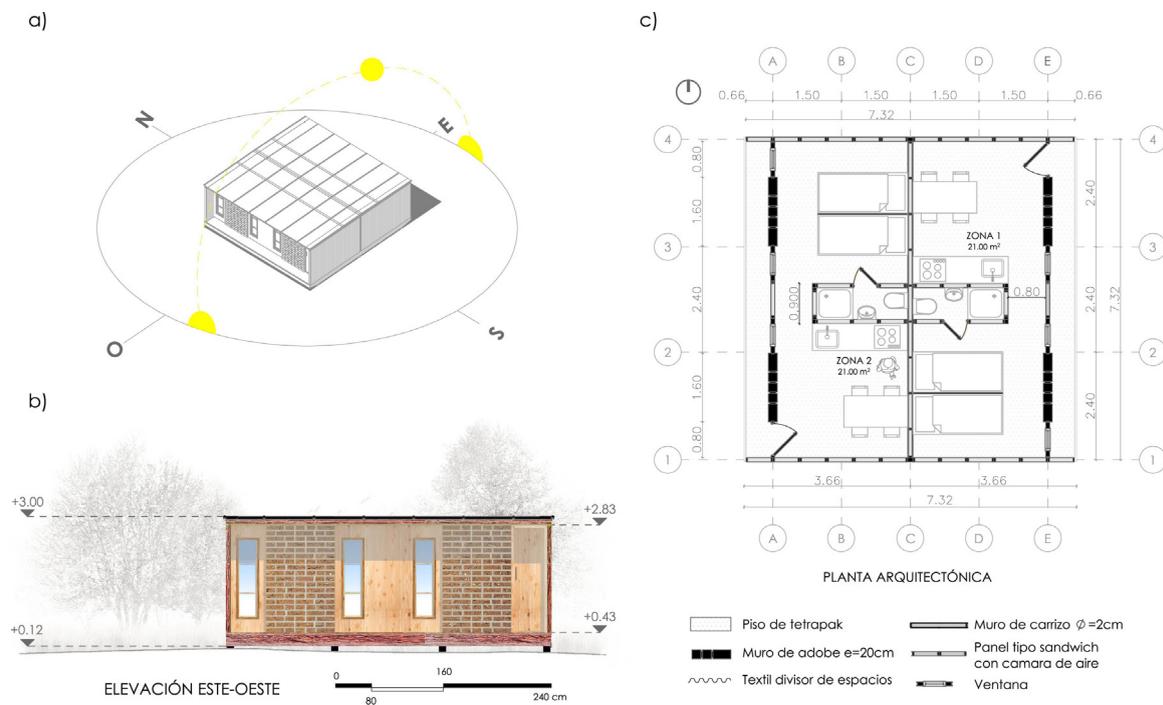


Figura 5: a) volumen, b) elevación este-oeste y c) planta arquitectónica del modelo. Fuente: Elaboración de los autores

a su vez, reduce su masa térmica provocando menores temperaturas y mayores oscilaciones térmicas (Torres-Quezada & Torres-Avilés, 2023b).

Por otra parte, otros estudios resaltan la importancia del uso de materiales reciclados para la construcción de VE (Arslan, 2007; Arslan & Cosgun, 2008). Las consideraciones más importantes de estos estudios son el uso de materiales de origen natural o reciclados como la tierra, la madera o poli-aluminio reciclado. Los materiales naturales son parte fundamental en la arquitectura vernácula del Ecuador (Yépez, 2012), los cuales reducen

el impacto ambiental de las viviendas (Rodríguez et al., 2021).

A partir de estos estudios se definieron las características específicas del sistema constructivo del prototipo planteado (Figura 4).

El modelo de VE andino se basa en lo siguiente: las paredes norte y sur están conformadas por un panel sandwich, la capa exterior es un tablero tipo Greentec de poli-aluminio (TPG1) y la interior es un tablero plywood, separadas por una cámara de aire. El piso contiene

Tabla 2: Parámetros de simulación. Fuente: Elaboración de los autores a partir de DesignBuilder (2016)

Elemento	Material	Espesor (mm)	λ (W/mK)	U(W/m ² K)
Piso	Greentec_TPG2	10	0.50	
	Cámara de aire	200		2.15
	Plywood	5.2	0.15	
Pared norte/sur	Greentec_TPG1	5	0.50	
	Aire	80		2.20
	Plywood	5.2	0.15	
Pared este/oeste	Adobe	200	0.17	0.76
	Pared interior	Plywood	5.2	0.15
Ventanas	Aire	80		2.08
	Plywood	5.2	0.15	
	Vidrio simple	4	0.90	6.121
Cubierta	Greentec tipo plano	5	0.50	
	Cámara de aire	100		2.20
	Plywood	5.2	0.15	
Características generales de simulación				
	Latitud/Longitud		-1.24908/-78.61675	
	Altitud		2597 msnm	
	Superficie		53.58m ²	
	Ocupación		0.15 personas/m ²	
	Infiltraciones		1.5 ren/h (constante)	
	Iluminación		2W/m ² (18-22h)	
	Cocina		3W/m ² (7-8h/12-13h/18-19h)	

un tablero TPG2 al interior y un tablero plywood en el interior, con una cámara de aire entre ellos. La superficie de la envolvente de mayor preocupación en el aspecto térmico fue la cubierta, dado que es por donde se dan las mayores pérdidas de calor (Torres-Quezada et al., 2018). Por lo tanto, la cubierta tiene un tablero tipo plano de poli-aluminio (TCP) en el exterior y plywood en el interior que funciona como cielo raso, separados por una cámara de aire. Respecto a las paredes este y oeste, se ha usado el adobe para incrementar la masa térmica del modelo. Por último, las ventanas son de vidrio simple de 4mm con marcos de madera.

En cuanto a las características morfológicas, la propuesta combina 2 espacios habitables que corresponden a la Zona 1 (Z1) y Zona 2 (Z2), cada uno destinado a una familia. La morfología se basa en módulos de 2.40x1.20m,

los cuales son las unidades modulares comerciales de los paneles. La modulación como base del diseño evitará los desperdicios de materiales y, por ende, reducirá el impacto ambiental.

Referente a la distribución interior, con el propósito de aprovechar las ganancias internas, todos los espacios se han vinculado alrededor de la cocina. Junto a este espacio se coloca el baño, el cual tiene su acceso desde el área de descanso (Figura 5).

De esta manera, el prototipo se concibe como un espacio habitable a corto y largo plazo que contempla un muro de adobe que no es un sistema constructivo de rápida construcción, pero que su inclusión solventa aspectos térmicos que deben ser considerados en VE. Según esto, y dado su diseño modular, el modelo permite

Tabla 3: Especificaciones y cantidades de los materiales utilizados. Fuente: Elaboración de los autores a partir de datos obtenidos de: [1]:Vázquez, (2001); [2]: Shukla et al., (2009); [3]: ECUAPLASTIC (2021); [4] Hammond & Jones (2008) [5]: EDIMCA (2021); [6]: González Stumpf et al., (2014); [7]: TECNICGLASS (2021)

* el *EI* del poli-aluminio se ha obtenido en función de los valores ponderados de polietileno (89.96 MJ/kg) y aluminio (108.6 MJ/kg) reciclado al 50%, los cuales tienen una proporción del 80% y 20% respectivamente.

Producto	P/u (kg)	Cantidad (u)	EI (MJ/kg)
Adobe	9.6 [1]	266	0.97[2]
TCP*	14.30 [3]	28	93.69[4]
TPG1*	15 [3]	12	93.69[4]
TPG2*	27.4 [3]	18	93.69[4]
Tablón	10.91 [5]	57	1.5[6]
Tabla 1[3]	7.34 [5]	118	1.5[6]
Tabla 2[3]	3.57 [5]	14	1.5[6]
Listón 1[3]	3.68 [5]	120	1.5[6]
Listón 2[3]	0.92 [5]	39	1.5[6]
Tablero plywood [3]	7.66 [5]	63	15[4]
Plancha de Vidrio[4]	10.8 [7]	6	16.81[4]

transformarse en unidades habitacionales con mayor superficie y con capacidad de albergar a más usuarios por tiempos prolongados.

CONFIGURACIÓN Y CÁLCULO DEL MODELO

SIMULACIONES TÉRMICAS

Para analizar el comportamiento térmico interior del modelo y evaluar la efectividad de las estrategias planteadas, se utiliza el software Design Builder con su motor de cálculo Energy Plus (DesignBuilder, 2016). Para esta evaluación se ha tomado la temperatura del aire interior (T_{ai}) como parámetro de referencia.

Como primer paso, se han configurado los inputs climáticos y las características del modelo. El archivo climático¹ de la ciudad de estudio fue obtenido de climate.onebuilding.org (2020).

Posterior a ello, se han definido las características térmicas de todos los materiales que componen los elementos de la envolvente. Además, se establecen las posibles infiltraciones exteriores, la ocupación y las fuentes de cargas internas. Las infiltraciones se han definido a partir de Torres-Quezada et al. (2019), donde se estipulan los valores aproximados de acuerdo con las características constructivas de las viviendas en Ecuador. Todos estos parámetros se detallan en la Tabla 2.

A continuación, se han escogido dos días de análisis con el propósito de representar de manera precisa las condiciones climáticas promedio (Día Promedio) y las condiciones de frío promedio (Día Extremo) en la ciudad

objeto de estudio. Estos días se han determinado a partir de los valores de temperatura exterior obtenidos de INAMHI (2017).

Para el Día Promedio, se ha considerado una temperatura media de 12.5°C, acompañada de valores máximos y mínimos de 17.9°C y 8.45°C, respectivamente. En el caso del Día Extremo, se ha seleccionado la temperatura promedio más baja registrada mensualmente durante el transcurso del año (11°C), junto con una temperatura máxima de 16.23°C y una temperatura mínima de 6.82°C.

Una vez obtenidos estos datos, se procedió a elegir dos días del archivo climático de simulación que se ajustaran a dichos valores. En consecuencia, se escogieron el 08/03 (Día Promedio) y el 09/08 (Día Extremo) como los días de simulación correspondientes.

Finalmente, los resultados térmicos serán analizados en comparación con el rango de confort (18-26°C) establecido por el Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (2011).

CÁLCULOS DE ENERGÍA INCORPORADA

Para evaluar el impacto ambiental de la propuesta, se toma como parámetro la Energía Incorporada de los materiales (EI), la cual corresponde a la energía que requiere cada material para producir una unidad de peso (Kumar et al., 2022). De manera específica, en este estudio se analiza el valor total de EI de cada material y el valor total del modelo (EI_t). Adicionalmente, para realizar comparaciones con otros estudios, EI_t se relaciona con el área total de construcción (MJ/m^2).

Para obtener el EI_T (MJ) de la vivienda se utiliza la ecuación 1, la cual implica la sumatoria de EI_T de cada uno de los materiales.

$$EI_T = \sum(EI \times P) \dots\dots\dots(\text{Ecuación 1})$$

Donde EI es la energía incorporada específica de cada material (MJ/kg) con un enfoque de cálculo de la Cuna a la puerta, con excepción de la madera que tiene un enfoque de la Cuna al sitio. P es el peso total de cada material (kg), que se obtiene de la multiplicación del peso por unidad de cada material por el número total de piezas utilizadas en el modelo. Las especificaciones y cantidades de cada uno de los materiales se muestran en la Tabla 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

SIMULACIONES TÉRMICAS

En la Figura 6 se muestran los resultados de la temperatura del aire interior (T_{ai}) de Z1 y Z2, y la temperatura del aire exterior (T_e) en el Día Promedio. Además, se ha graficado el rango de confort (18-26°C). Por una parte, en Z1, la T_{ai} promedio es de 22.2°C con una oscilación diaria de 6.1°C, con una T_{ai} mínima de 19.2°C (6h00) y una T_{ai} máxima de 25.3°C (19h00). Por otra parte, en Z2 se determina que la T_{ai} promedio es de 23.3 °C. La oscilación diaria es de 7.4°C con una T_{ai} mínima de 19.9 °C (6h00) y una T_{ai} máxima de 27.3°C (20h00).

Conforme a estos resultados, la T_{ai} de Z1 se mantiene dentro del rango de confort durante todo el día. Asimismo, en Z2 no se presentan temperaturas de disconfort térmico, salvo entre las 17-21h00. En este lapso, la T_{ai} de Z2 está 1.3°C sobre el rango de confort.

Para entender en detalle las estrategias planteadas y los resultados mostrados, la Figura 7 señala los flujos de calor en Z1 y Z2 analizados en el Día Promedio.

La T_{ai} máxima en las dos zonas evidencia un retraso aproximado de 6 horas con respecto a T_e . Este retraso está influenciado principalmente por la masa térmica de las paredes de adobe, junto con los aportes de iluminación y cocción y, en el caso de Z2, por la captación solar directa por ventanas.

La T_{ai} mínima en Z1 y Z2 se mantiene alrededor de los 20°C, lo cual refleja la eficacia de las estrategias planteadas en la envolvente vertical y horizontal. Las pérdidas por cubierta y pisos son mínimas durante el día. Las mayores pérdidas se dan por los muros, principalmente debido a las paredes norte y sur. Por el contrario, la influencia del muro este en Z1 y el muro oeste en Z2 hacen que las pérdidas se reduzcan a partir de las 16h.

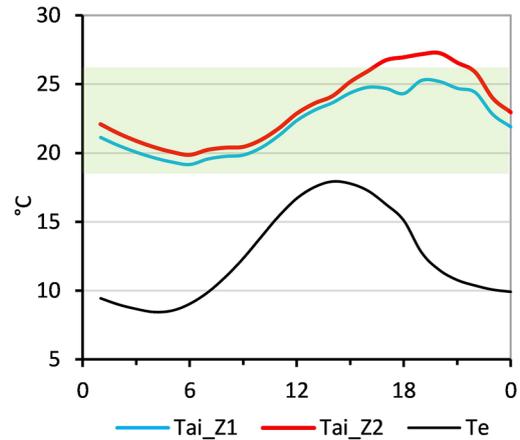


Figura 6: T_{ai} de Z1 y Z2, y T_e en el Día Promedio. Fuente: Elaboración de los autores

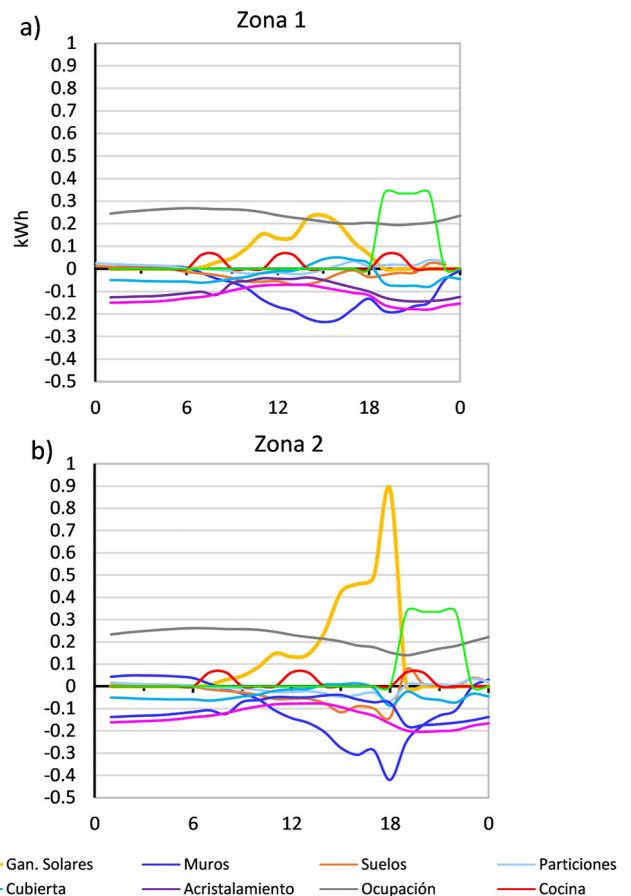


Figura 7: Flujos de calor de Z1 (a) y Z2 (b) en el Día Promedio. Fuente: Elaboración de los autores

Este flujo se reduce y se mantiene muy cercano a 0 hasta las 08h00, incluso en Z2 llega a ser positivo. Por último, el flujo de calor por particiones es muy cercano a 0 kWh durante todo el día, lo cual responde a que estas paredes intercambian calor con las zonas contiguas, y no con el exterior.

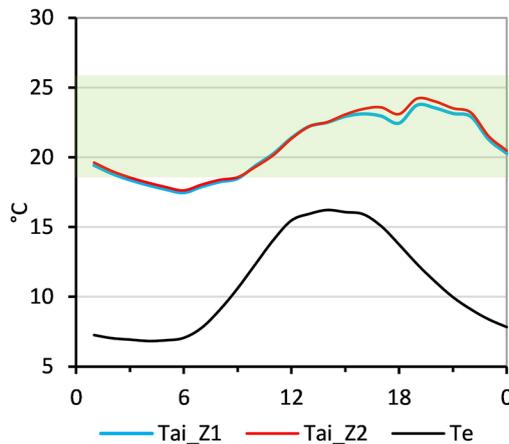


Figura 8: T_{ai} de la Z1 y Z2 y T_e en el Día Extremo. Fuente: Elaboración de los autores

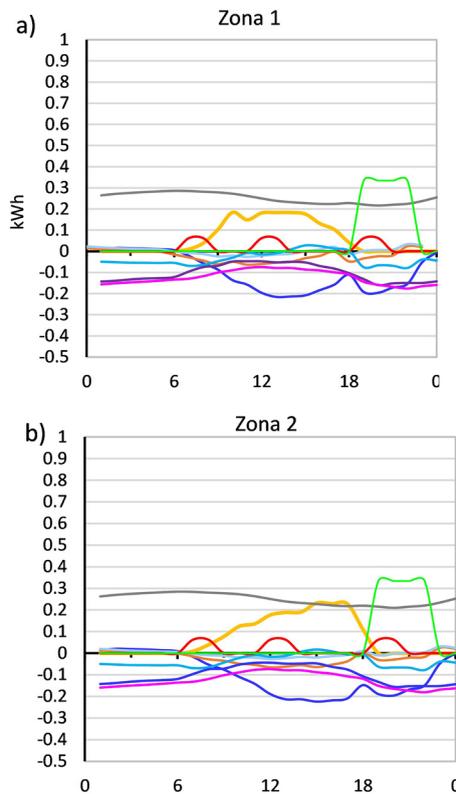


Figura 9: Flujos de calor de Z1 (a) y Z2 (b) en el Día Extremo. Fuente: Elaboración de los autores

Por otra parte, en el Día Extremo (Figura 8), la T_{ai} promedio de Z1 es de 20.7°C, con una T_{ai} mínima de 17.5°C y una T_{ai} máxima de 23.7°C. La T_{ai} de Z1 y Z2 se encuentran dentro del rango de confort, con excepción de pocas horas nocturnas, sin embargo, está solo 0.5°C por debajo del rango de confort.

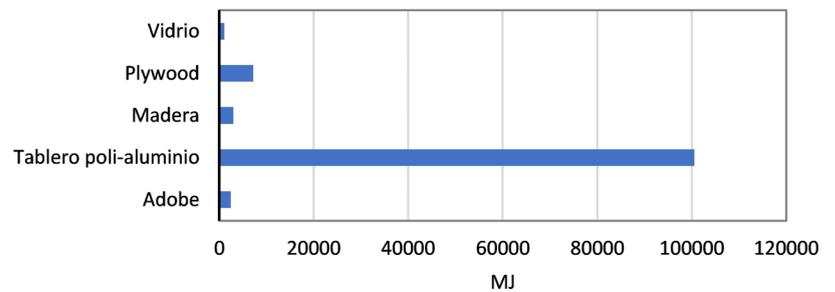


Figura 10: EI_t de los materiales empleados en el modelo andino. Fuente: Elaboración de los autores

Al contrario del Día Promedio, la T_{ai} máxima no sobrepasa el límite superior y la oscilación térmica es menor. Nuevamente, la T_{ai} máxima muestra un retraso aproximadamente de 6 horas, lo cual está influenciado principalmente por la masa térmica de las paredes este y oeste y por los aportes de iluminación, cocción y captación solar. Esta última es mucho menor que en el Día Promedio, dado que en el Día Extremo la mayor parte de radiación solar es difusa (Figura 9).

Finalmente, la T_{ai} mínima llega hasta los 17.5°C, la cual es menor a la del Día Promedio. No obstante, se mantiene dentro del rango de confort.

Si comparamos estos resultados con otros estudios de VE mencionados previamente, las viviendas emergentes en otras regiones tienden a utilizar, como en el caso de Corea, el aislamiento y la calefacción para alcanzar el confort térmico (Hong, 2016), o bien, si es que uno de estos no se utiliza, existirá desconfort térmico, como lo visto en Japón (Sinohara et al., 2014). En el caso de la región andina ecuatoriana, el presente estudio evidencia que existen otras estrategias para alcanzar una T_{ai} de 24°C, por lo que seguir modelos como los de Corea y Japón implicaría un gasto económico y ambiental innecesario.

CÁLCULOS ENERGÍA INCORPORADA

La Figura 10 muestra la EI_t de cada uno de los materiales utilizados en el modelo. La mayor cantidad de EI_t se encuentra en los tableros de poli-aluminio con 100586 MJ, seguido del plywood y la madera con 7239 MJ y 3023 MJ, respectivamente. En último lugar está el vidrio y el adobe. Cabe destacar que el vidrio, aun con el poco porcentaje utilizado, tiene casi el mismo valor que el adobe, el cual es mucho más representativo en el modelo. La EI_t de toda la vivienda es de 114414 MJ.

Con el propósito de realizar un análisis comparativo, la Figura 11 muestra el valor de EI_t relacionado con el área total de la vivienda (53.58m²), en conjunto con los valores de otras viviendas de carácter social en climas andinos

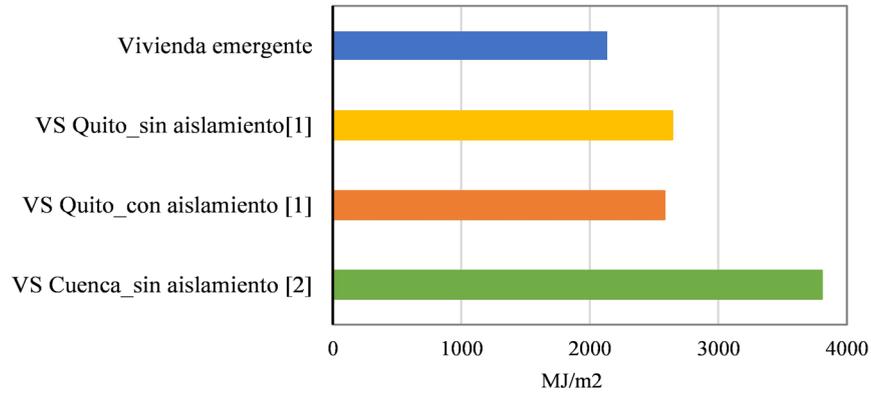


Figura 11: EI_T del modelo planteado, y EI_T de viviendas de carácter social en Ecuador. Fuente: Elaboración de los autores a partir de datos obtenidos de: [1]: Macias et al. (2017), [2]: Torres-Quezada & Torres-Avilés (2023a)

Tabla 4: Características de vivienda de carácter social en Ecuador. Fuente: Elaboración de los autores a partir de datos obtenidos de: [1]: Macias et al. (2017), [2]: Torres-Quezada & Torres-Avilés (2023b)

Vivienda	Paredes	Cubierta	Área (m²)
VS_Quito_sin aislamiento [1]	hormigón de 10 cm	Galvalume	55
VS_Quito_con aislamiento [1]	tipo sándwich, tableros de fibrocemento y 8 cm Poliestireno expandido	Galvalume	55
VS_Cuenca_sin aislamiento [2]	Bloque de hormigón enlucido	Fibrocemento	60

ecuatorianos. Se ha escogido esta tipología dada la carencia de datos locales de VE.

La Tabla 4 muestra las características de las viviendas utilizadas para el análisis comparativo.

Los resultados muestran que el modelo propuesto tiene una EI_T de 2135.38 MJ/m², la cual es menor a la energía gastada por las viviendas sociales de Quito y Cuenca. En el caso de la VS sin aislamiento de Quito, esta cuenta con 2640 MJ/m², mientras que la VS con aislamiento es de 2580 MJ/m². La vivienda construida en Cuenca cuenta con una EI_T de 3806 MJ/m².

Según lo expuesto, se observa que la diferencia más significativa se manifiesta en la vivienda construida en Cuenca (1671 MJ/m²), la cual cuenta con paredes de bloque de hormigón que incrementan en gran medida su EI_T . En contraste, con las viviendas de Quito se registra una diferencia de 505 MJ/m² con las desprovistas de aislamiento y de 445 MJ/m² con la que posee aislamiento.

Estos datos muestran que la vivienda sin aislamiento tiene una mayor EI_T que la vivienda con aislamiento, debido a que la primera tiene un sistema construido de paredes de hormigón, lo cual eleva significativamente su EI_T . Cabe mencionar que en estas viviendas no se han considerado las puertas, pisos o ventanas para el cálculo.

Este análisis comparativo muestra el alto impacto que

tiene el uso de materiales aislantes y los industrializados en el incremento de la EI_T . En el prototipo planteado, el poli-aluminio es el material con mayor impacto, aun cuando es reciclado. Esto implica que su uso excesivo es contraproducente, sin embargo, es escogido por su fácil mantenimiento y durabilidad ante las condiciones climáticas de la región.

CONCLUSIÓN

A partir de este estudio, se puede concluir que las estrategias pasivas planteadas, es decir, la captación solar directa, la masa térmica, la compactidad y el aprovechamiento de ganancias internas, son eficaces para que una VE alcance el confort en un Día Promedio (23.5°C) y Extremo (21.8°C) en el clima Andino. Tanto los resultados obtenidos, como la temperatura mínima (18°C aprox), destacan que el uso de aislamiento en este clima no es necesario, pues puede ser sustituido por una cámara de aire.

Por otra parte, se logra determinar que la EI_T del sistema de construcción planteado es menor que la registrada en otros prototipos de carácter social con estándares de eficiencia energética. Este modelo representa el 60% de una vivienda social en Ecuador.

Los tableros de poli-aluminio usados en el modelo, si bien son fabricados a partir de material reciclado,

estos tienen altos niveles de energía incorporada dado que el porcentaje que se recicla no es alto y, además, el polietileno y aluminio reutilizado requieren una gran cantidad de energía para su producción. Esto abre una rama de investigación sobre la eficacia del reciclaje de estos y otros materiales en los sistemas constructivos.

Finalmente, esta investigación resalta que el uso de estrategias pasivas en la región Andina del Ecuador puede ser suficiente para alcanzar la habitabilidad térmica, reducir el impacto ambiental y, más importante aún, reducir tanto el uso de materiales innecesarios como el valor económico del prototipo. Los resultados en este estudio pueden ponerse en práctica y promover la colaboración de mano de obra local para su construcción, ya que integra sistemas constructivos vernaculares y otros de fácil instalación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por la Universidad Católica de Cuenca-PROYECTO DAMA-215543.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Álvarez, M. & Avilés, J. (2012). *Ceniza Volcánica: Un nuevo Agente de Contaminación Química*. Unidad de Preparación para desastres Químicos, Ministerio de Salud Pública, 5.

Andersen, M., Discoli, C. A., Viegas, G. M. & Martini, I. (2017). Monitoreo energético y estrategias de RETROFIT para viviendas sociales en clima frío. *Hábitat Sustentable*, 7(2), 50-63. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2017.07.02.05>

Arslan, H. (2007). Re-design, re-use and recycle of temporary houses. *Building and Environment*, 42(1), 400-406. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.032>

Arslan, H. & Cosgun, N. (2008). Reuse and recycle potentials of the temporary houses after occupancy: Example of Duzce, Turkey. *Building and Environment*, 43(5), 702-709. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.051>

Azari, R. & Abbasabadi, N. (2018). Embodied energy of buildings: A review of data, methods, challenges, and research trends. *Energy and Buildings*, 168, 225-235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.003>

CLIMATE CONSULTANT. (2021). Climate consultant software (6.0.15). Windows. Informe technologies.

CLIMATE.ONEBUILDING.ORG (2020). *Repository of free climate data for building performance simulation*. Recuperado de: https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/ECU_Ecuador/index.html

Curado, A. & De Freitas, V.P. (2019). Influence of thermal insulation of facades on the performance of retrofitted social housing buildings in Southern European countries. *Sustainable Cities and Society*, 48, 101534. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101534>

Dabaieh, M. & Serageldin, A. A. (2020). Earth air heat exchanger, Trombe wall and green wall for passive heating and cooling in premium passive refugee house in Sweden. *Energy Conversion and Management*, 209, 112555. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112555>

Da Casa Martín, F., Celis D'Amico, F. & Echeverría Valiente, E. (2019). Metodología para elaborar una cartografía regional y aplicar estrategias bioclimáticas según la Carta de Givoni. *Hábitat Sustentable*, 9(2), 52-63. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2019.09.02.05>

DESIGNBUILDER (2016). DesignBuilder+EnergyPlus software (4.5.0.148). UK: DesignBuilder.

Dirección de Monitoreo de Eventos Adversos (2023). SitRep No.18-Deslizamiento Casual-Alausí: Informe de situación Nacional. Recuperado de: <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/informes-de-situacion-actual-por-eventos-adversosecuador/>

ECUAPLASTIC.(2021). Ecopak. Cubiertas y tableros ecológicos_Greentec. Recuperado de: <https://ecuaplastic.com/index.php/productos/ecopak/14-productos/ecopak/71-greentec>

EDIMCA. (2021). *Sección de productos Edimca*. Recuperado de: <https://edimca.com.ec/productos-y-herrajes-de-madera.html>

Espinosa, C. F. & Cortés, A. (2015). Confort higro-térmico en vivienda social y la percepción del habitante. *Revista INVI*, 30(85), 227-242. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-83582015000300008>

Fonseca-Rodríguez, O., Sheridan, S., Häggström, E. & Schumann, B. (2021). Effect of extreme hot and cold weather on cause-specific hospitalizations in Sweden: A time series analysis. *Environmental Research*, 193, 110535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110535>

García Mitjans, S. M. (2022). *Influencia de la tipología edificatoria y la morfología urbana en la demanda energética de la vivienda plurifamiliar en Barcelona* [Proyecto Final de Màster Oficial]. UPC, Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/2117/375334>

Givoni, B. (1969). *Climate and architecture*. Amsterdam; London; New York: Ed. Elsevier.

González Stumpf, M. A., Kulakowski, M. P., Breitenbach, L. G. & Kirch, F. (2014). A case study about embodied energy in concrete and structural masonry buildings. *Revista de la Construcción*, 13(2), 9-14. DOI: <https://doi.org/10.4067/s0718-915x2014000200001>

Gullbrekken, L., Grynning, S. & Gaarder, J. E. (2019). Thermal Performance of Insulated Constructions—Experimental Studies. *Buildings*, 9(2), 49. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings9020049>

Hammond, G. & Jones, C. (2008). *Inventory of carbon & energy [ICE] Version 1.6a*. Recuperado de: <https://perigordvacance.typepad.com/files/inventoryofcarbonandenergy.pdf>

Hong, Y. (2016). A study on the condition of temporary housing following disasters: Focus on container houses. *Frontiers of Architectural Research*, 6(3), 374-383. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2017.04.005>

Hughes, C., Natarajan, S., Liu, C., Chung, W. J. & Herrera, M. (2019). Winter thermal comfort and health in the elderly. *Energy Policy*, 134, 110954. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.110954>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de la República del Ecuador [INAMHI]. (2017). *Anuario meteorológico N° 53-2013* (J. Olmedo, Ed.). Recuperado de: https://www.inamhi.gob.ec/docum_institucion/anuarios/meteorologicos/Am_2013.pdf

Iwata, T., Harada, E. & Maly, E. (2023). Towards improving provision of wooden temporary housing: Analysis of repairs of temporary housing built by local contractors after the Great East Japan Earthquake. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 86, 103537. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103537>

Lines, R., Faure Walker, J.P. & Yore, R. (2022). Progression through emergency and temporary shelter, transitional housing and permanent housing: A longitudinal case study from the 2018 Lombok earthquake Indonesia. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 75, 102959. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.102959>

Koezjakov, A., Urge-Vorsatz, D., Crijns-Graus, W. & Van Den Broek, M. (2018). The relationship between operational energy demand and embodied energy in Dutch residential buildings. *Energy and Buildings*, 165, 233-245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.036>

Kumar, P. P., Venkatraj, V. & Dixit, M. K. (2022). Evaluating the temporal representativeness of embodied energy data: A case study of higher education buildings. *Energy and Buildings*, 254, 111596. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111596>

Macias, J., Iturburu, L., Rodriguez, C., Agdas, D., Boero, A. & Soriano, G. (2017). Embodied and operational energy assessment of different construction methods employed on social interest dwellings in Ecuador. *Energy and Buildings*, 151, 107-120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.016>

Marocco, R., & Winter, T. (1997). Bosquejo de la evolución geodinámica del Ecuador. En Alain Winckell (Ed.), *Geografía básica del Ecuador : 4. Geografía física : 1. Las condiciones del medio natural : los paisajes naturales del Ecuador*, 15-52. CEDIG. Recuperado de: https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers16-09/010022382.pdf

MINISTERIO DE DESARROLLO URBANO Y VIVIENDA (2011). Eficiencia energética en la construcción en Ecuador. *Norma Ecuatoriana de La Construcción NEC-11*.

O'Hegarly, R., Kinnane, O., Lennon, D. & Colclough, S. (2021). In-situ U-value monitoring of highly insulated building envelopes: Review and experimental investigation. *Energy*

and Buildings, 252, 111447. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111447>

Rodríguez Ruiz, J. L., Castañeda Hernández, C. G., Cruz López, R. & Neria Hernández, R. (2021). Diseño de un módulo de bahareque autoconstructivo de bajo costo e impacto ambiental para viviendas unifamiliares. *Revista RedCA*, 3(9), 158-181. DOI: <https://doi.org/10.36677/redca.v3i9.15866>

Santana Oliveira, B., Torres-Quezada, J., Coch, H. & Isalgue, A. (2022). Monitoring and Calculation Study in Mediterranean Residential Spaces: Thermal Performance Comparison for the Winter Season. *Buildings*, 12(3), 325. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12030325>

Secretaría De Gestión De Riesgos. (2018). *Plan nacional de respuesta ante desastres*. Recuperado de <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/08/Plan-Nacional-de-Respuesta-SGR-RespondeEC.pdf>

Shukla, A., Tiwari, G. N. & Sodha, M. S. (2009). Embodied Energy analysis of adobe house. *Renewable Energy*, 34(3), 775-761. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.002>

Sinohara, N., Tokumara, M., Kazama, M., Yonemoto, Y., Yoshioka, M., Kagi, N., Hasegawa, K., Yoshino, H. & Yanagi, U. (2014). Indoor air quality and thermal comfort in temporary houses occupied after the Great East Japan Earthquake. *Indoor air*, 24(4), 425-437. DOI: <https://doi.org/10.1111/ina.12082>

TECHO. (2020). *Techo Memoria 2020*. Recuperado de: https://techo.org/wp-content/uploads/2021/11/TECHO-MEMORIA-2020-2_compressed.pdf

TECNICGLASS. (2021). Tecnicglass. Solutions for Glazing and Glass Industry: *Cuanto pesa un Vidrio - Formula para calcular el peso de un vidrio*. Recuperado de: <https://tecnicglass.com/consejos/cuanto-pesa-un-vidrio/>

Thonipara, A., Runst, P., Ochsner, C. & Bizer, K. (2019). Energy efficiency of residential buildings in the European Union—An exploratory analysis of cross-country consumption patterns. *Energy Policy*, 129, 1156-1167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.03.003>

Thormark, C. (2002). A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation and recycling potential. *Building and Environment*, 37(4), 429-435. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0360-1323\(01\)00033-6](https://doi.org/10.1016/s0360-1323(01)00033-6)

Torres-Quezada, J., Coch, H. & Isalgué, A. (2019). Assessment of the reflectivity and emissivity impact on light metal roofs thermal behaviour, in warm and humid climate. *Energy and Buildings*, 188-189, 200-208. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.022>

Torres-Quezada, J. Coch Roura, H., Isalgué Buxeda, A. & López Besora, J. (2018). The roof Impact on the heat balance of low height buildings at low latitudes. *PLEA 2018: Smart and Healthy Within the Two-Degree Limit: proceedings of the 34th International Conference on Passive and Low Energy Architecture*: Dec 10-12, 2018 Hong Kong, China (pp. 937-938). The Chinese University of Hong Kong. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/2117/129130>

Torres-Quezada, J. & Torres-Avilés, A. (2023a). The Construction Evolution and Their Energetic Impact in Andean Region Buildings. En *Energetic Characterization of Building Evolution*, 1-48. Springer Science+Business Media. Recuperado de: https://doi.org/10.1007/978-3-031-21598-8_1

Torres-Quezada, J. & Torres-Avilés, A. (2023b). The Constructive Evolution of the Envelope. The Impact on Indoor Thermal Conditions in Andean Regions. En *Energetic Characterization of Building Evolution*, 49-77. Springer Science+Business Media. Recuperado de: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-21598-8_2

Torres-Quezada, J., Torres, A., Isalgué, A. & Pages-Ramon, A. (2022). The evolution of embodied energy in andean residential buildings. Methodology applied to Cuenca-Ecuador. *Energy and Buildings*, 259, 111858. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111858>

Vázquez Espí, M. (2001). Construcción e impacto sobre el ambiente: el caso de la tierra y otros materiales. *Informes de la Construcción*, 52(471), 29-43. DOI: <https://doi.org/10.3989/ic.2001.v52.i471.681>

Yépez Tambaco, D. A. (2012). *Análisis de la arquitectura vernácula del Ecuador: Propuestas de una arquitectura contemporánea sustentable*. [Tesis de máster]. Universidad Politécnica de Catalunya. Recuperado de: https://www.academia.edu/29898709/An%C3%A1lisis_de_la_arquitectura_vern%C3%A1cula_del_Ecuador_Propuestas_de_una_arquitectura_contempor%C3%A1nea_sustentable

Zevallos, O. (1994). Lecciones del deslizamiento "La Josefina"-Ecuador. En Conferencia Interamericana sobre reducción de los desastres naturales. Cattedena de Indias, Colombia. Recuperado de: <https://www.eird.org/deslizamientos/pdf/spa/doc5089/doc5089.htm>

Zhou, B., Wei, P., Tan, M., Xu, Y., Ding, L., Mao, X., Zhao, Y. & Kosonen, R. (2019). Capture efficiency and thermal comfort in Chinese residential kitchen with push-pull ventilation system in winter-a field study. *Building and Environment*, 149, 182-195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.017>