

RESEARCH ARTICLE

Análisis comparativo de la energía incorporada total específica. Caso de estudio: Edificación residencial unifamiliar y multifamiliar Cuenca-Ecuador.

Paúl Mateo López Mogrovejo ¹  Jefferson Torres-Quezada ² 

¹ Universidad de Cuenca, Centro de Posgrados de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Maestría en Construcciones, Cuenca, EC 010203, Ecuador.

² Universidad Católica de Cuenca, CONSISO Lab, Cuenca, EC 010102, Ecuador.

✉ Correspondencia: paul.lopezm@ucuenca.edu.ec 📞 + 593 98 465 5824

DOI/URL: <https://doi.org/10.53313/gwj73184>

Resumen: En el mundo y en el Ecuador la vivienda sigue siendo una de las necesidades fundamentales para el desarrollo humano y el gozo de una vida digna en conformidad con la constitución ecuatoriana; además es un derecho humano según los estándares internacionales de las Naciones Unidas [15]. Es imprescindible la construcción de soluciones habitacionales que cumplan con normas de calidad, parámetros técnicos y puedan solventar esta necesidad de vivienda, pero simultáneamente se presenta el debate teórico sobre la ciudad de baja densidad versus la ciudad de alta densidad. En esta discusión la mayoría de los autores están a favor de una ciudad compacta y densificada [5,17]; sin embargo, en estos estudios no se considera el impacto ambiental y energético que se produce con la construcción, la cual es una de las actividades que genera mayor contaminación a nivel mundial. Recientemente los países latinoamericanos han introducido avances tecnológicos en sistemas y materiales constructivos debido a la reducción de los costos de obra; sin embargo, estos nuevos procesos conllevan altos índices de energía incorporada. La presente investigación analiza la construcción densificada desde el punto de vista del impacto ambiental y energético, considerando los materiales y sistemas constructivos empleados durante la última década. El análisis se realiza mediante la comparativa entre dos casos de estudio: una edificación de vivienda unifamiliar y una edificación de vivienda multifamiliar, ambos casos ubicados en la ciudad de Cuenca-Ecuador. Se cuantifica la Energía Específica Total Incorporada (STEE) y se aborda el Peso Específico Total (STW) de los dos casos de estudio, los elementos y materiales constructivos se han clasificado en: Estructura, Envoltorio y Acabados, basados en la metodología del estudio de Torres [34]. Los resultados de esta investigación sirven como un punto de vista adicional de algunos de los aspectos ambientales y energéticos implícitos en la construcción de una ciudad compacta y de alta densidad.

Palabras claves: Baja densidad; Alta densidad; Energía Incorporada; Energía Específica total Incorporada (STEE); Construcción.



Cita: López Mogrovejo, P. M., & Torres-Quezada, J. (2024). Análisis comparativo de la energía incorporada total específica. Caso de estudio: Edificación residencial unifamiliar y multifamiliar Cuenca-Ecuador. Green World Journal, 07(3), 184. <https://doi.org/10.53313/gwj73184>

Received: 30/October/2024
Accepted: 20/November/2024
Published: 23/November/2024

Prof. Carlos Mestanza-Ramón, PhD.
Editor-in-Chief / CaMeRa Editorial
editor@greenworldjournal.com

Editor's note: CaMeRa remains neutral with respect to legal claims resulting from published content. The responsibility for published information rests entirely with the authors.



© 2024 CaMeRa license, Green World Journal. This article is an open access document distributed under the terms and conditions of the license.

Creative Commons Attribution (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

Comparative analysis of total specific embodied energy. Case study: Single-family and multi-family residential buildings in Cuenca, Ecuador.

Abstract: In the world and in Ecuador, housing continues to be one of the fundamental needs for human development and the enjoyment of a dignified life in accordance with the Ecuadorian constitution; It is also a human right according to the international standards of the United Nations [15]. It is essential to build housing solutions that meet quality standards and technical parameters and can solve this housing need, but simultaneously the theoretical debate on the low-density city versus the high-density city is presented. In this discussion, most authors are in favor of a compact and densified city [5,17]; However, these studies do not consider the environmental and energy impact that occurs with construction, which is one of the activities that generates the greatest pollution worldwide. Recently, Latin American countries have introduced technological advances in construction systems and materials due to the reduction of construction costs; However, these new processes involve high levels of embodied energy. This research analyzes densified construction from the point of view of environmental and energy impact, considering the materials and construction systems used during the last decade. The analysis is carried out by comparing two case studies: a single-family housing building and a multi-family housing building, both cases located in the city of Cuenca-Ecuador. The Total Embodied Specific Energy (STEE) is quantified and the Total Specific Weight (STW) of the two case studies is addressed, the construction elements and materials have been classified into: Structure, Envelope and Finishes, based on the methodology of the Torres study [34]. The results of this research serve as an additional point of view of some of the environmental and energy aspects implicit in the construction of a compact and high-density city.

Keywords: Low density; High density; Specific total embodied energy (STEE); Total Specific Weight; Construcción.

1. Introducción

Desde 1945, la humanidad ha experimentado un aumento en el consumo de materiales, directamente relacionado con la expansión urbana y el crecimiento poblacional [30]. Según la ONU, se proyecta que la población mundial pasará de 8.2 mil millones en 2024 a 10.3 mil millones en los próximos cincuenta años [23], aumentando significativamente la demanda de vivienda y la explotación de recursos naturales para la construcción de edificaciones [31]. A nivel global, la vivienda es un derecho fundamental, considerado esencial para la calidad de vida y el desarrollo urbano sostenible [23]. Sin embargo, el sector de la construcción es responsable del 50% de la explotación de recursos naturales y residuos generados, y del 48% del consumo energético global [6-11].

La eficiencia energética en la construcción es crucial para la sostenibilidad. A medida que las edificaciones alcanzan estándares de energía cero en su operación, la energía incorporada (EE) en su construcción gana relevancia [8]. En este contexto, se distinguen dos componentes energéticos principales: la energía incorporada (EE), que abarca el gasto energético desde la producción de materiales hasta su eliminación final, y la energía operativa (EO), relacionada con la climatización, iluminación y funcionamiento de electrodomésticos [12, 25]. La reducción de EO ha sido el foco de la mayoría de estrategias de sostenibilidad, aunque en ocasiones estos esfuerzos incrementan la EE [4, 20, 25, 34].

Diversos estudios destacan la importancia de reducir el consumo energético desde la fase de diseño y construcción [12, 25, 29]. En Latinoamérica, y particularmente en Ecuador, se han propuesto estrategias que promueven el uso de materiales locales, lo cual reduce el impacto ambiental y el consumo energético [16, 22, 24]. Sin embargo, la creciente demanda residencial [35] ha impulsado el uso de sistemas constructivos industrializados [18, 19]. Que, aunque agilizan la construcción, aumentan la EE [20, 25].

En Ecuador, el sector de la construcción ha experimentado un crecimiento anual del 7%, salvo en la crisis del COVID-19 [19]. En 2023, las viviendas residenciales alcanzaron un total de 30,896 edificaciones, mayormente construidas con sistemas industrializados [18,19]. Como consecuencia, la EE ha aumentado en los últimos 40 años, multiplicándose hasta 2.15 veces [33]. Esta tendencia también se ha observado en Cuenca, donde el crecimiento urbano ha favorecido la expansión hacia las periferias mediante viviendas unifamiliares [13]. Este fenómeno ha promovido la baja densidad habitacional y un consumo elevado de suelo urbano.

En respuesta a los desafíos de crecimiento urbano, surge el debate entre ciudades densificadas y no densificadas. Según teorías urbanísticas como el Smart Growth y el Nuevo Urbanismo, las ciudades densificadas podrían reducir el consumo de suelo y recursos naturales, promoviendo la construcción de viviendas multifamiliares [5,17]. Sin embargo, en Cuenca, la mayoría de las edificaciones son unifamiliares de baja altura (67.2% en 2023) [19,32].

El crecimiento vertical de las ciudades propone un uso más eficiente del espacio urbano mediante edificaciones de alta densidad, aunque frecuentemente no se consideran los índices de energía incorporada (EE) en su construcción [2]. La mayoría de los estudios se han centrado en la (EO) debido a la complejidad de medir la (EE), lo que ha subestimado su impacto ambiental [10,25]. La ausencia de estudios detallados sobre la (EE), que abarque desde la extracción de materiales hasta la edificación, limita la adopción de estrategias urbanas sostenibles que reduzcan la huella de carbono de nuevas construcciones y compromete la sostenibilidad a largo plazo [2].

Investigaciones anteriores han señalado que la (EE) en casos específicos puede representar hasta el 60% del consumo energético total de un edificio durante su ciclo de vida [27,29]. Es por esto que los estudios recientes abogan por un análisis equitativo tanto de la (EO) y la (EE) en el diseño urbano y construcción en general [11,25]. En Suecia, Shadram y Mukkavaara compararon seis tipos de edificaciones residenciales de alta densidad, concluyendo que, para alcanzar la eficiencia energética óptima, deben considerarse estrategias multiobjetivo en las primeras fases del diseño [28].

Algunos estudios han cuantificado la EE de viviendas multifamiliares en altura y construidas en madera TFP, hallando que para este sistema constructivo, en edificaciones de cuatro pisos, la EE puede disminuir hasta en un 36.76% comparado con edificaciones de un piso, sugiriendo que las construcciones más altas son más eficientes energéticamente [20]. Otros estudios en Irán compararon sistemas constructivos tradicionales y modernos, evidenciando que técnicas vernáculas como el uso de tierra reducen la EE en un 43% y la EO en un 88%, resaltando los beneficios de estos enfoques en contextos de vida útil corta [24].

En Ecuador, la mayoría de los estudios de (EE) se centran en viviendas unifamiliares de baja densidad. Los resultados sugieren que el uso de sistemas industrializados ha incrementado los índices de EE en la estructura, envolvente y acabados de estas edificaciones en las últimas décadas. Si bien algunos estudios en Cuenca han medido la EE en edificaciones residenciales unifamiliares, no existen investigaciones comparativas entre viviendas unifamiliares (baja densidad) y multifamiliares (alta densidad) [34]. Esto es fundamental para determinar si el modelo de crecimiento urbano debería enfocarse en una u otra tipología habitacional, considerando no solo el aprovechamiento del suelo, sino también las implicaciones energéticas y ambientales de cada tipo de construcción.

Este estudio pretende definir y comparar los índices de EE entre viviendas unifamiliares y multifamiliares en Cuenca, Ecuador. Asimismo, aborda los aspectos ambientales y energéticos asociados a la construcción de ciudades de alta y baja densidad, buscando brindar datos que apoyen decisiones de planificación urbana sostenible en la región. Para lograrlo, se establecieron los siguientes objetivos:

1. Definir dos casos de estudio con características comparables, pero de diferente tipología.
2. Aplicar la metodología de Torres, para determinar los índices STEE de cada tipología [34].

Este estudio se enfoca en la región andina del Ecuador, específicamente en Cuenca, donde se analizarán dos tipologías arquitectónicas que emplean materiales y sistemas constructivos similares. La metodología sigue el enfoque de Torres Quezada et al. [34], aunque los resultados no pueden generalizarse. Esta investigación representa un primer paso hacia el análisis comparativo de la EE entre construcciones de alta y baja densidad en el contexto urbano de Cuenca, contribuyendo al conocimiento necesario para orientar un desarrollo urbano ambientalmente sostenible.

2. Materiales y métodos

2.1. Descripción de la metodología

El proceso para definir y comparar el impacto energético incorporado (EE) en tipologías de vivienda unifamiliar y multifamiliar en Cuenca, Ecuador, comienza con la selección de la muestra basada en los siguientes criterios:

1. Periodo de construcción: de 2010 a 2024.
2. Ubicación: área urbana de Cuenca, debido a la escasez de proyectos multifamiliares en zonas rurales y la accesibilidad de datos.
3. Usuario final: dirigido a la clase media, para excluir materiales ornamentales innecesarios.
4. Sistema constructivo: estructura metálica y mampostería de ladrillo, ampliamente utilizados en Cuenca y Latinoamérica.

Estos criterios, similares para ambas tipologías, buscan evitar sesgos en esta investigación comparativa. La selección de estudios de caso incluyó una vivienda unifamiliar de dos plantas y una multifamiliar de diez plantas, ambas cumpliendo con los requisitos, con datos obtenidos de fuentes confiables, incluidas bases de datos municipales y la investigación de Torres [34].

El paso siguiente fue la cuantificación del material de construcción en cada edificación. Para la unifamiliar se utilizaron datos existentes, mientras que en la multifamiliar se generó un modelo BIM basado en planos constructivos. Los datos fueron clasificados en tres componentes principales: estructura, envolvente y acabados, excluyendo instalaciones técnicas (agua, electricidad, plomería, etc.).

Con los volúmenes de obra, se calculó la energía incorporada (EE) en cada caso de estudio siguiendo la metodología de Torres, basada en la metodología de Dascalaki et al. [8]. El objetivo fue obtener la Energía Incorporada Total Específica (STEE: MJ/m²), que permite evaluar y comparar ambos casos. La ecuación empleada es:

$$STEE = \Sigma(W * EE) / S$$

donde:

- STEE: Energía Incorporada Total Específica (MJ/m²),
- W: peso total de cada material (kg),
- EE: Energía Incorporada Específica (MJ/kg),
- S: superficie total construida (m²).

La aplicación de esta fórmula implica multiplicar la cantidad de cada material por su peso específico (W) y luego por su (EE), (véase *Tabla 1*), para así obtener el total de energía incorporada (TEE), que dividido entre el área construida da el valor de (STEE: MJ/m²). También se calculó el Peso Total Específico por m² (STW: kg/m²).

Tabla 1. Peso específico y EE específica de cada material utilizado en este estudio.

| MATERIALES | VALOR EE (MJ/kg) | PAÍS FUENTE | PESO ESPECIFICO (kg/m ³) |
|---|---------------------|-------------|---|
| Hormigón 1:2:4* | 0,82 | Inglaterra | 2400 |
| Mortero de Cemento 1:4 | 1,11 | Inglaterra | 2001 |
| Piedra Estructural | 0,5 | Inglaterra | 2700 |
| Ladrillo Macizo artesanal | 1,33 | Ecuador | 1800 |
| Ladrillo hueco artesanal | 1,33 | Ecuador | 1800 |
| Cerámica vitrificada | 8 | España | 4500 |
| Porcelanato | 25,5 | España | 5000 |
| Aluminio (33% reciclado) | 155 | Inglaterra | 2700 |
| Acero (40% reciclado) | 24,84 | Ecuador | 7850 |
| Tol galvanizado (primaria) | 40 | Inglaterra | 7850 |
| Vidrio Simple (virgen) | 17,98 | Inglaterra | 2500 |
| Yeso artesanal con fibra vegetal (Estuco) | 2,5 | España | 1500 |
| Yeso | 2,5 | España | 1750 |
| Tablero de yeso | 7 | España | 833 |
| Estructura galvanizada para tableros de Yeso | 7 | España | 7850 |
| Pintura plástica (Látex) | 20 | España | 1400 |
| Piso de madera Laminada | 36,4 | Alemania | 650 |
| Lámina de polietileno | 110 | Inglaterra | 10 |
| Tablero de partículas de madera (MDP, MDF, ETC) | 23 | Inglaterra | 670 |

* Elaboración propia, pero los valores de EE y pesos específicos han sido utilizados de la investigación de Torres Quezada [34], estos datos provienen de varias fuentes y bajo diversos parámetros de consideración, por lo que no deben ser generalizados.

Los resultados se analizaron en dos partes: primero, evaluando los componentes estructura, envolvente y acabados por separado; luego, con la EE total de ambas tipologías. Se utilizó el método comparativo [9], para validar la hipótesis y cumplir el objetivo de la investigación.

2.2. Casos de estudio

Los sistemas constructivos tanto de la vivienda unifamiliar C1, como la vivienda multifamiliar C2 se describen en la siguiente tabla (véase Tabla 2).

Tabla 2. Cuadro comparativo de materiales y sistema constructivo empleado en cada Caso de Estudio.

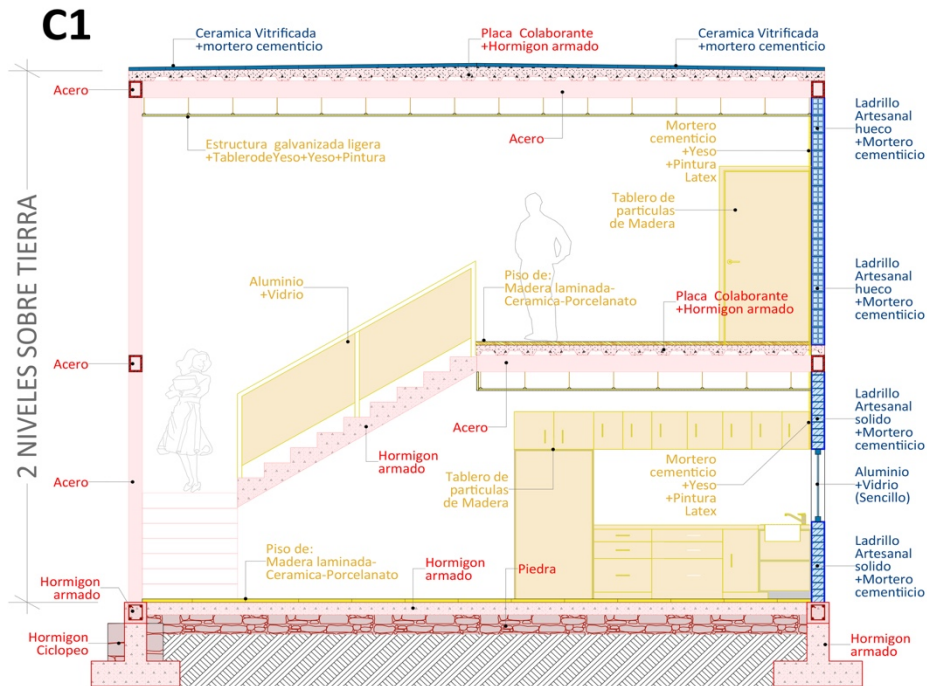
| ELEMENTO | C1 UNIFAMILIAR | C2 MULTIFAMILIAR | |
|------------|----------------|---|--|
| ESTRUCTURA | CIMENTOS | Hormigón armado, Hormigón Ciclópeo,y Piedra. | Hormigón armado, Hormigón Ciclópeo,y Piedra. |
| | COLUMNAS | Perfiles de Acero estructural. | Perfiles de Acero estructural. |
| | VIGAS | Perfiles de Acero estructural. | Perfiles de Acero estructural. |
| | CONTRAPISO | Hormigón Armado + Malla electro soldada | Hormigón Armado + Malla electro soldada |
| | LOSAS | Placa colaborante + Hormigón armado | Placa colaborante + Hormigón armado |
| | CUBIERTA | Placa colaborante + Hormigón armado | Placa colaborante + Hormigón armado |
| | ESCALERAS | Hormigón Armado | Perfiles de Acero estructural + hormigón Armado |
| ENVOLVENTE | MUROS | Perímetro con ladrillo artesanal macizo, divisiones con ladrillo artesanal hueco. | Todo ladrillo artesanal alivianado. |
| | CUBIERTA | Cerámica vitrificada. | Cerámica vitrificada. |
| | VENTANAS | Aluminio y Vidrio sencillo sin aislación térmica o acústica. | Aluminio y Vidrio sencillo sin aislación térmica o acústica. |
| ACABADOS | PISOS | Madera laminada, cerámica , porcelanato. | Madera laminada y cerámica. |
| | PUERTAS | Tablero a base de aglomerado de partículas de madera. | Tablero a base de aglomerado de partículas de madera. |
| | MUROS | Enlucido a base de mortero cementicio+ yeso + pintura plastica latex o porcelanato. | Enlucido a base de mortero cementicio+ yeso + pintura plastica latex. |
| | PASAMANOS | Aluminio y Vidrio sencillo. | Perfiles de Acero soldados y pintados. |
| | CIELO RASO | Estructura metálica galvanizada ligera+placa de yeso+empaste+pintura latex. | Estructura metálica galvanizada ligera+placa de yeso+ empaste+pintura latex. |
| | MOBILIARIO | Tablero a base de aglomerado de partículas de madera | Tablero a base de aglomerado de partículas de madera. |

2.2.1. Caso (C1) edificación de vivienda unifamiliar

La construcción tiene dos niveles y un área total de 209 m² (véase Figura 1). Fue seleccionada por contar con información completa y precisa, y está ubicada en la zona de expansión urbana según el GAD Municipal de Cuenca [14]. La vivienda tiene todos los servicios básicos, como agua, electricidad, alcantarillado e internet.



Figura 1. Fotografía caso de estudio



El sistema constructivo se explica a continuación, además (véase *Tabla 2* y *Figura 2*):

- Estructura: Cimientos de hormigón ciclópeo y armado; estructura principal de columnas y vigas de acero. Las losas son de hormigón armado en planta baja y de placa colaborante de acero con hormigón en planta alta y cubierta.
- Envoltente: Mampostería de ladrillo artesanal en paredes externas e internas, con ventanas de vidrio y aluminio sencillo. La cubierta está revestida con cerámica vitrificada.
- Acabados: Pisos de madera laminada, cerámica y porcelanato; puertas y mobiliario en tableros de partículas de madera; paredes con mortero cementicio, yeso y pintura, y porcelanato en baños. Los pasamanos son de aluminio y vidrio, y los tumbados de estructura galvanizada y tablero de yeso.



Figura 2. Esquema del sistema constructivo de C1.

2.2.2. Caso (C2) edificación de vivienda multifamiliar en altura

La construcción tiene 4,667 m², con diez plantas (dos subterráneas y ocho sobre el nivel del suelo) y se clasifica como vivienda multifamiliar (véase *Figura 3*). Se encuentra en la zona urbana de

3. Resultados

3.1. Análisis por componente

3.1.1. Estructura

Los resultados generales de los casos de estudio en la componente Estructura se centran en el STEE (MJ/m²) y el STW (kg/m²) (Véase Figura 5). Se analiza en detalle los parámetros y elementos de cada tipología (Véase Figuras 6 y 7) y se examinan los materiales utilizados (Véase Tabla 3). Los resultados muestran diferencias significativas: el caso C1 tiene un STEE de 1860 MJ/m² y un STW de 691 kg/m², mientras que C2 tiene un STEE de 3006 MJ/m² y un STW de 748 kg/m². Esto implica que la edificación multifamiliar C2 supera a C1 en 1146 MJ/m² y 57 kg/m², lo que representa un 38,12% y 7,62% más en STEE y STW, respectivamente.

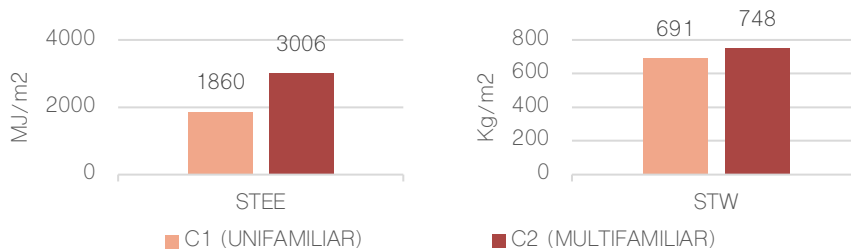


Figura 5. Comparación de STEE y STW en el componente de Estructura.

Aunque ambas tipologías usan el mismo sistema constructivo, C2 presenta valores más altos en ciertos elementos estructurales (Véase Figuras 6 y 7). En C1, las vigas tienen el máximo STEE de 568 MJ/m² y las escaleras el mínimo de 21 MJ/m²; en C2, las vigas alcanzan 1159 MJ/m² y el contrapiso tiene un mínimo de 47 MJ/m². Los valores de STEE son más altos en C2 debido a su complejidad estructural, que incluye dos niveles de subsuelo, aumentando el uso de concreto armado. Las columnas y vigas en C2 son más grandes y gruesas, y el sistema de losas requiere mayor material. Las escaleras en C2, por normativa, son de emergencia, lo que incrementa su uso de material. C1, sin embargo, supera a C2 en contrapiso y cubierta debido a su área de construcción. Por ejemplo, un m² de cubierta en C1 protege 2 m² de construcción, mientras que en C2, protege 10 m².

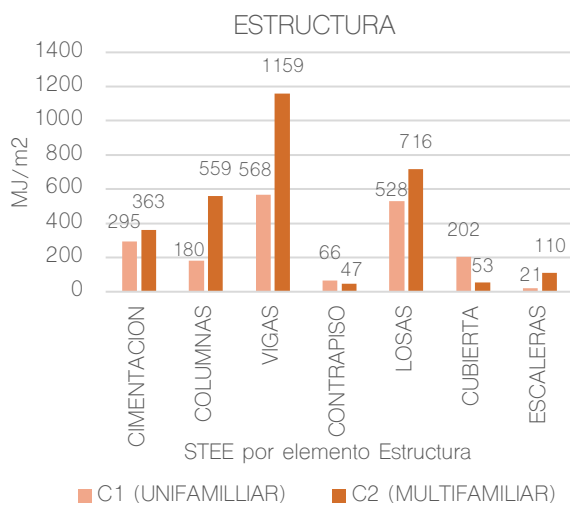


Figura 6. STEE por elemento del componente Estructura.

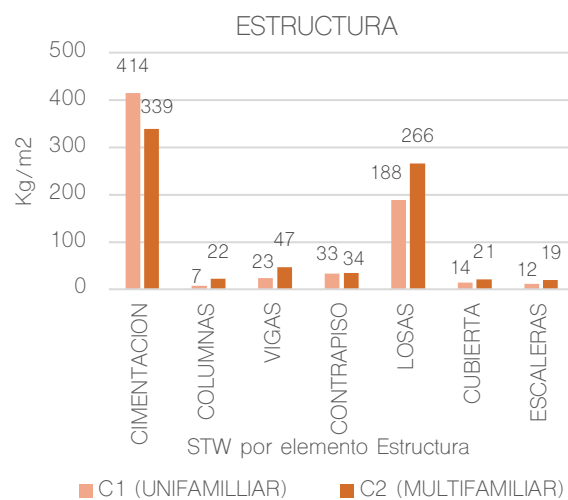


Figura 7. STW por elemento del componente Estructura.

Tabla 3. STEE (MJ/m²) y STW (kg/m²) de cada material utilizado para el componente Estructura de cada tipología.

| ELEMENTOS ESTRUCTURA | MATERIAL | C1 | | C2 | |
|----------------------|--------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| | | UNIFAMILIAR | | MULTIFAMILIAR | |
| | | STEE (MJ/m ²) | STW (Kg/m ²) | STEE (MJ/m ²) | STW (Kg/m ²) |
| Cimientos | Piedra | 114,29 | 228,58 | 22,40 | 44,79 |
| | Concreto | 151,19 | 184,38 | 237,60 | 289,75 |
| | Acero | 29,95 | 1,21 | 103,14 | 4,15 |
| Columnas | Acero | 179,97 | 7,25 | 558,65 | 22,49 |
| Vigas | Acero | 567,52 | 22,85 | 1158,85 | 46,65 |
| Contrapiso | Concreto | 25,89 | 31,58 | 27,64 | 33,70 |
| | Acero | 40,20 | 1,62 | 18,88 | 0,76 |
| Losas | Concreto | 145,01 | 176,84 | 205,33 | 250,41 |
| | Lámina galvanizada | 270,64 | 6,77 | 355,93 | 8,90 |
| | Acero | 112,56 | 4,53 | 154,41 | 6,22 |
| Cubierta | Concreto | 6,59 | 8,04 | 16,51 | 20,13 |
| | Lámina galvanizada | 144,72 | 3,62 | 25,94 | 0,65 |
| | Acero | 51,17 | 2,06 | 10,59 | 0,43 |
| Escaleras | Concreto | 9,42 | 11,48 | 12,57 | 15,33 |
| | Acero | 11,10 | 0,45 | 97,27 | 3,92 |
| TOTAL | | 1860 | 691 | 3006 | 748 |

* Elaboración propia

En la *Tabla 3*, el acero es el material más utilizado en C1, con un STEE de 992,47 MJ/m² (53,35% del total), seguido por concreto (338,10 MJ/m², 18,18%) y lámina galvanizada (144,72 MJ/m², 7,78%). En C2, el acero también domina, con 2101,80 MJ/m² (69,93%), seguido por concreto (499,65 MJ/m², 16,62%) y lámina galvanizada (355,93 MJ/m², 11,84%). Las diferencias en STEE y STW reflejan la complejidad de cada tipología. C2 no solo usa más materiales, sino que presenta un aumento del 1,61 en STEE respecto a C1, subrayando la importancia de la selección del sistema constructivo para el impacto ambiental.

3.1.2. Envoltente

En cuanto a la envoltente, (*la Figura 8*) presenta los resultados generales de C1 y C2, centrados en STEE (MJ/m²) y STW (kg/m²). Las (*Figuras 9 y 10*) desglosan estos parámetros por elementos de la envoltente, y (*la Tabla 4*) detalla los materiales utilizados. C1 muestra un STEE de 983 MJ/m² y un STW de 383 kg/m², mientras que C2 tiene un STEE de 301 MJ/m² y un STW de 111 kg/m². Esto implica que C1 supera a C2 en 682 MJ/m² y 272 kg/m², representando un incremento del 69,3% en STEE y 71,1% en STW.

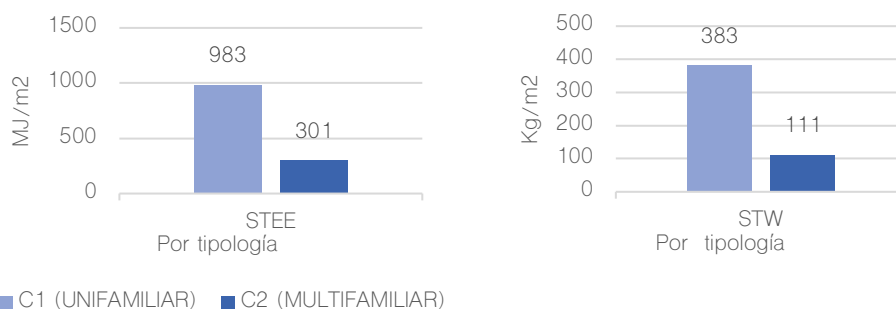


Figura 8. Comparación de STEE y STW en el componente Envoltente.

Ambas edificaciones tienen sistemas constructivos similares, pero C1 presenta valores más altos en todos los elementos. En C1, las ventanas tienen un STEE de 464 MJ/m² y los muros 452 MJ/m², mientras que en C2, las ventanas tienen 149 MJ/m² y los muros 129 MJ/m² (Véase Figura 9 y 10). C1 supera a C2 en la envolvente, ya que sus muros son perimetrales en sus cuatro caras y utiliza ladrillo macizo en lugar de ladrillo hueco como en C2. Esto resulta en que C1 requiera más material, incrementando su STEE hasta 3,5 veces más que C2.

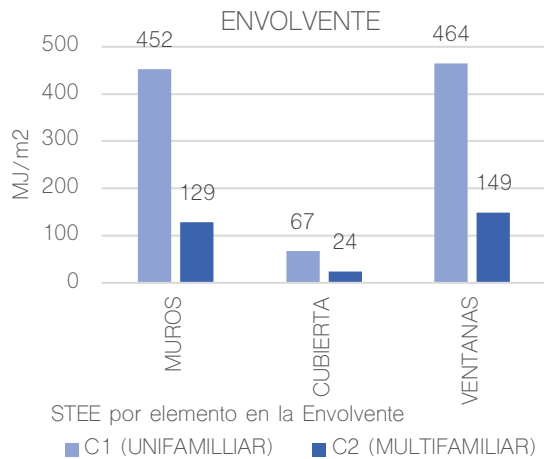


Figura 9. STEE por elemento del componente Envolvente.

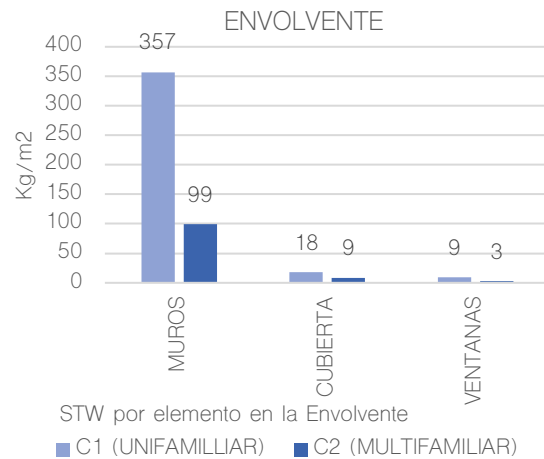


Figura 10. STW por elemento del componente Envolvente.

En cuanto a las ventanas, C1 también supera a C2 en 3,11 veces, debido a un diseño personalizado. La relación ventana-pared es del 20,8% en C1 y del 16,5% en C2, lo que afecta el STEE. C1 también tiene una cubierta con un área que resulta en un STEE 2,79 veces mayor que C2. La Tabla 4 revela que en C1, el aluminio es el material más utilizado, con un STEE de 345,08 MJ/m² (35,09% del total), seguido por ladrillo macizo (170,53 MJ/m², 17,34%) y ladrillo hueco (167,87 MJ/m², 17,07%). En C2, el aluminio es igualmente el material principal (114,66 MJ/m², 38,07%), seguido por ladrillo hueco (109,76 MJ/m², 36,45%) y vidrio simple (34,08 MJ/m², 11,32%).

Tabla 4. STEE (MJ/m²) y STW (kg/m²) de cada material utilizado para el componente Envolvente de cada tipología.

| ELEMENTOS ENVOLVENTE | MATERIAL | C1 | | C2 | |
|----------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| | | UNIFAMILIAR | | MULTIFAMILIAR | |
| | | STEE (MJ/m ²) | STW (Kg/m ²) | STEE (MJ/m ²) | STW (Kg/m ²) |
| Muros | Ladrillo artesanal | 170,53 | 128,03 | 0,00 | 0,00 |
| | Ladrillo artesanal Hueco | 167,87 | 126,03 | 109,76 | 82,40 |
| | Mortero de Cemento | 113,99 | 102,70 | 18,87 | 17,00 |
| Cubierta | Cerámica Vitrificada | 54,93 | 6,87 | 16,52 | 2,07 |
| | Mortero de Cemento | 12,06 | 10,86 | 7,26 | 6,54 |
| Ventanas | Vidrio Simple | 118,99 | 6,62 | 34,08 | 1,90 |
| | Aluminio | 345,08 | 2,23 | 114,66 | 0,74 |
| TOTAL | | 983 | 383 | 301 | 111 |

* Elaboración propia

En resumen, C1 presenta mayores valores de STEE en la envolvente que C2, atribuibles a su diseño arquitectónico y elección de materiales, lo que afecta la sostenibilidad y el consumo de recursos en edificaciones nuevas y renovaciones.

3.1.3. Acabados

Los resultados de los casos de estudio en la componente Acabados se centran en el STEE (MJ/m²) y el STW (kg/m²) (Véase Figura 11). Se analizan los parámetros y elementos de cada tipología (Véase Figuras 12 y 13) y se examinan los materiales utilizados (Véase Tabla 5). C1 presenta un STEE de 1195 MJ/m² y un STW de 203 kg/m², mientras que C2 tiene un STEE de 809 MJ/m² y un STW de 238 kg/m². Esto significa que C1 supera a C2 en 386 MJ/m² en

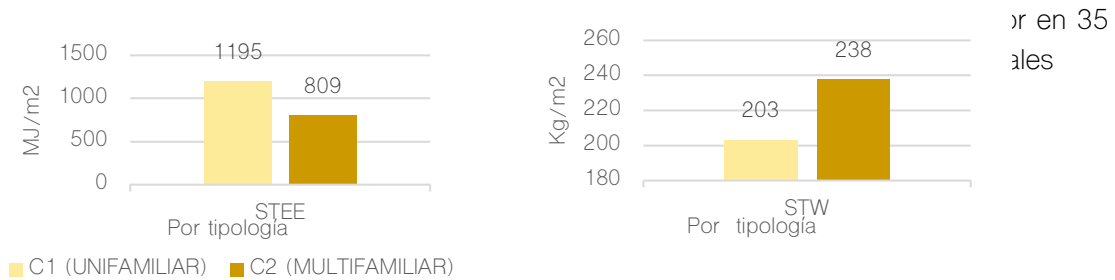


Figura 11. Comparación de STEE y STW en el componente Acabados.

C1 presenta un STEE máximo en acabados de muros (401 MJ/m²) y mínimo en pasamanos (57 MJ/m²); en C2, los muros también son máximos (307 MJ/m²) y pasamanos mínimos (24 MJ/m²) (Véase Figura 12 y 13). En general, C1 tiene valores de STEE más altos debido a la utilización de porcelanato, en contraste con la

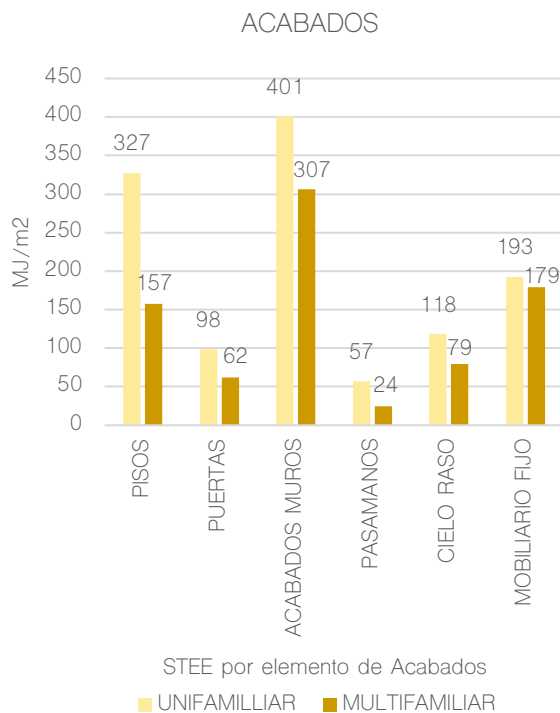


Figura 12. STEE por elemento del componente Acabados.

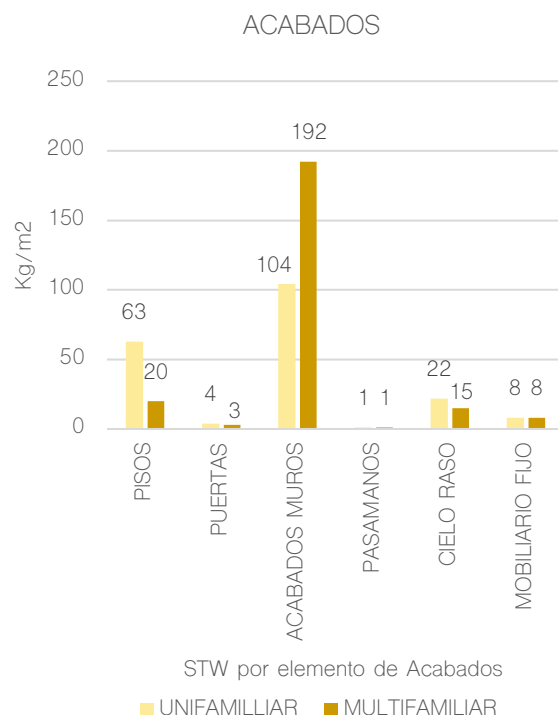


Figura 13. STW por elemento del componente Acabados.

cerámica vitrificada de C2. Los pasamanos en C1 usan aluminio y vidrio, materiales con alto índice de EE, mientras que C2 usa acero liviano.

Los elementos como puertas y mobiliario fijo también presentan mayores valores en C1, pero esto se debe a que C2 tiene dos niveles de subsuelo donde no se instalan acabados, afectando el área total de los cálculos. Aunque C2 sobresale en STW gracias a acabados de muros, que incluyen empastado de yeso en exteriores, lo que no se aplica en C1.

En la Tabla 5, el porcelanato es el material más destacado en C1, con un STEE de 392,22 MJ/m² (32,83% del total), seguido por tableros de madera (291,20 MJ/m², 24,37%) y mortero de cemento (146,37 MJ/m², 12,25%). En C2, los tableros de madera son los más relevantes (241,63 MJ/m², 29,87%), seguidos por mortero de cemento (178,59 MJ/m², 22,08%).

Tabla 5. STEE (MJ/m²) y STW (kg/m²) de cada material utilizado para el componente Acabados de cada tipología.

| ELEMENTOS ACABADOS | MATERIAL | C1 UNIFAMILIAR | | C2 MULTIFAMILIAR | |
|--------------------|--|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | STEE | STW | STEE | STW |
| | | (MJ/m ²) | (Kg/m ²) | (MJ/m ²) | (Kg/m ²) |
| Pisos | Piso de madera Laminada | 65,83 | 1,81 | 110,23 | 3,03 |
| | Lámina de Polietileno | 0,58 | 0,01 | 0,97 | 0,01 |
| | Cerámica Vitrificada | 104,35 | 13,04 | 31,97 | 4,00 |
| | Porcelanato | 108,12 | 4,24 | 0,00 | 0,00 |
| | Mortero de Cemento | 48,51 | 43,70 | 14,04 | 12,64 |
| Puertas | Tablero de Partículas de Madera MDP | 98,41 | 4,28 | 62,22 | 2,71 |
| Acabados de Muros | Mortero de Cemento | 97,87 | 88,17 | 164,56 | 148,25 |
| | Empaste de Yeso | 10,54 | 4,21 | 97,43 | 38,97 |
| | Pintura plástica Látex | 8,19 | 0,41 | 7,57 | 0,38 |
| | Porcelanato | 284,10 | 11,14 | 0,00 | 0,00 |
| | Cerámica Vitrificada | 0,00 | 0,00 | 37,00 | 4,62 |
| Pasamanos | Vidrio Simple | 17,21 | 0,96 | 0,00 | 0,00 |
| | Aluminio | 40,05 | 0,26 | 0,00 | 0,00 |
| | Acero | 0,00 | 0,00 | 24,27 | 0,98 |
| Cielo Raso | Estructura Galvanizada para tableros de yeso | 26,19 | 3,74 | 17,53 | 2,50 |
| | Tablero de Yeso | 67,67 | 9,67 | 45,31 | 6,47 |
| | Empaste de Yeso | 21,15 | 8,46 | 14,16 | 5,66 |
| | Pintura plástica Látex | 3,29 | 0,16 | 2,20 | 0,11 |
| Mobiliario fijo | Tablero de Partículas de Madera MDP | 192,78 | 8,38 | 179,41 | 7,80 |
| TOTAL | | 1195 | 203 | 809 | 238 |

* Elaboración propia

En conclusión, los acabados en C1 tienen mayor impacto en el STEE que en C2, lo que resalta la importancia del diseño y selección de materiales para mejorar la sostenibilidad y reducir el consumo de recursos en nuevas edificaciones y renovaciones.

3.2. Análisis general de todos los componentes: Estructura, Envoltente y Acabados.

En los anteriores numerales los resultados han sido analizados de manera individual para cada componente. En este punto, los resultados de STEE y STW se enfocan en la totalidad de la

edificación, el análisis en conjunto de los tres componentes, Estructura, Envolverte y Acabados, medidos en las dos tipologías de vivienda estudiadas, C1 y C2. (Véase Figura 14 y 15).

Los dos casos de estudio presentan valores diferentes, por un lado, el caso C1 muestra un STEE total de 4038 MJ/m² y un STW de 1277 kg/m²; por otro lado, el caso C2 tiene un STEE total de 4116 MJ/m² y un STW de 1097 kg/m². De acuerdo con esto, la edificación multifamiliar C2 tiene un valor STEE de 78 MJ/m² y un valor de STW de 180 kg/m² mayor que la edificación unifamiliar C1, lo que implica que C2 es más intensiva en energía en comparación con C1. Esto refleja las diferencias en el uso de materiales y el impacto ambiental asociado.

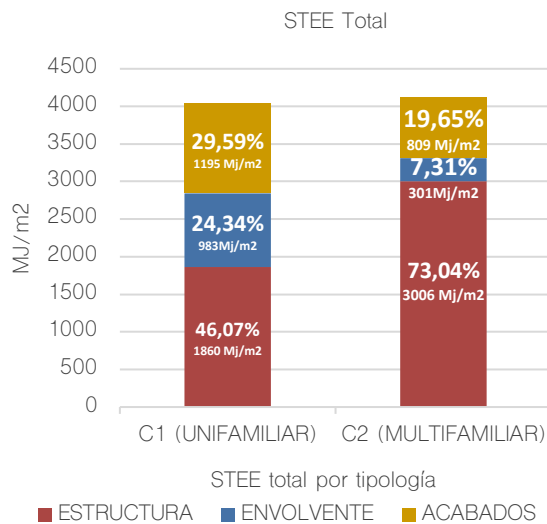


Figura 14. Comparación STEE total por Tipologías.

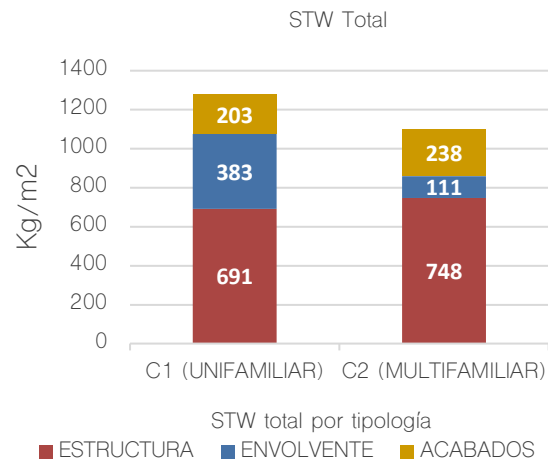


Figura 15. Comparación STW total por Tipologías.

Como se observa, C2 supera a C1 en los componentes Estructura y Acabados, pero C1 tiene valores más altos en la envolverte y Acabados. Este análisis resalta la importancia de considerar cada componente y su contribución al impacto ambiental de la edificación, así como la necesidad de un diseño que optimice el uso de recursos y minimice el consumo de energía.

4. Discusión

Los resultados obtenidos del análisis de los casos de estudio C1 y C2 evidencian cómo el diseño arquitectónico, los materiales seleccionados y el sistema constructivo impactan directamente en el consumo de energía y recursos. C1, aunque parece ser más eficiente en términos de envolverte y acabados, presenta un valor total de STEE más bajo. Por el contrario, C2, a pesar de tener un valor mayor de STEE, es más intensivo en el uso de recursos, lo que sugiere un mayor impacto ambiental.

Además, el estudio muestra que la complejidad arquitectónica de C2, que incluye elementos estructurales adicionales y acabados personalizados, contribuye a su mayor STEE. Esto resalta la necesidad de un análisis integral en el diseño de edificaciones, considerando no solo la eficiencia energética de los materiales y sistemas, sino también el impacto a largo plazo en el medio ambiente.

Estos hallazgos son fundamentales para guiar futuras decisiones en la planificación y construcción de edificaciones, promoviendo prácticas más sostenibles y responsables que reduzcan el consumo de recursos y la huella ambiental de la arquitectura contemporánea.

4. Conclusión

Este estudio compara la Energía Incorporada Total Específica (STEE) en edificaciones residenciales unifamiliares y multifamiliares en Cuenca, Ecuador, en respuesta al crecimiento urbano disperso de la ciudad. Utilizando la metodología de Torres Quezada et al. [34], se especificaron los materiales de construcción según su función (estructura, envolvente y acabados) y se calculó la contribución del STEE y el STW. Esto permitió discutir las implicaciones del crecimiento vertical versus horizontal y analizar el impacto energético y de masa incorporada en los componentes de cada tipo de edificación.

Se concluyó que la "Estructura" es el componente de mayor peso en el STEE para ambos tipos de vivienda. Sin embargo, en edificaciones multifamiliares, su influencia es mucho mayor debido a la presencia de elementos constructivos adicionales, como sótanos, ductos de ascensor, escaleras de emergencia y refuerzos en vigas y columnas. En cambio, la "Envolvente" es el componente con menor impacto en el STEE en ambos tipos de vivienda, siendo especialmente bajo en las multifamiliares por su diseño arquitectónico, relación ventana-pared y selección de materiales. Los "Acabados" tienen una influencia media en el STEE para ambas, aunque es menor en las multifamiliares debido al uso de materiales más sencillos o visibles, como ladrillo artesanal. En términos generales, el impacto ambiental de las viviendas multifamiliares es ligeramente inferior al de las unifamiliares, con una diferencia del 1.93%, lo cual sugiere que la densificación podría ser un modelo favorable para Cuenca, aunque la diferencia no es significativa. Esto sugiere que el beneficio en STEE es mínimo en ambas tipologías de construcción, dado que la estructura sigue siendo el principal determinante del STEE final.

Las conclusiones resaltan la importancia de la planificación en diseño, materiales y escala para la eficiencia energética, proporcionando un marco valioso para investigaciones futuras y prácticas en construcción sostenible. No obstante, este estudio no aborda algunos aspectos importantes como los beneficios de evitar la extensión de servicios básicos, la red de transporte público, la infraestructura pública, entre otros factores externos que, al relacionarse con la construcción multifamiliar, podrían conllevar un ahorro energético significativo.

Este estudio representa un precedente importante para futuras investigaciones. Se sugiere realizar análisis adicionales de la STEE en edificaciones multifamiliares empleando otros sistemas constructivos, ya que podrían arrojar resultados diferentes. También se recomienda explorar edificios multifamiliares de menor altura, en los que las normativas y exigencias estructurales son menos rigurosas, lo cual facilitaría la identificación de un equilibrio entre los niveles construidos y la Energía Incorporada Total Específica. Para alcanzar un equilibrio energético en el ciclo de vida de una edificación, es crucial tener en cuenta tanto la Energía Incorporada (EE) como la Energía Operativa (EO), contribuyendo a un enfoque más sostenible. Explorar estas áreas adicionales permitiría obtener una perspectiva más completa para fortalecer la eficiencia energética y la sostenibilidad en la construcción de edificaciones residenciales. Los resultados de esta investigación son específicos para los casos de estudio seleccionados, por lo que la información no debe generalizarse.

Contribución de autores: Los autores participaron en todos los apartados del documento.

Financiamiento: Los autores financiaron la integridad del estudio. Paúl López agradece a la Maestría en Construcciones de la Universidad de Cuenca. Este trabajo recibió soporte de la Universidad

Católica de Cuenca y el grupo CAT a través del proyecto de Investigación DAMA II con código PICODS21-35.

Conflictos de interés: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

1. Acevedo Agudelo, H.; Vásquez Hernández, A.; Ramírez Cardona, D. Sostenibilidad: Actualidad y necesidad en el sector de la construcción en Colombia. *Redalyc.org, Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal* 2012, 105–117.
2. Al-Kodmany, K. Sustainable High-Rise Buildings: Toward Resilient Built Environment. *Front. Sustain. Cities* 2022, 4, 2624–9634. <https://doi.org/10.3389/frsc.2022.782007>.
3. Arenas, N. F.; Shafique, M. Reducing embodied carbon emissions of buildings – a key consideration to meet the net zero target. *Sustain. Futur.* 2024, 7, 100166. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2024.100166>.
4. Azari, R.; Abbasabadi, N. Embodied energy of buildings: A review of data, methods, challenges, and research trends. *Elsevier* 2018, 225–235.
5. Cabrera Jara, N. E.; Orellana Vintimilla, D. A.; Hermida Palacios, M. A.; Osorio Guerrero, P. E. Evaluando la sustentabilidad de la densificación urbana. Indicadores y su dimensión espacial en el caso de Cuenca (Ecuador). *Univ. Nac. Colomb. – Sede Bogotá – Fac. Artes – Inst. Investig. Hábitat, Ciudad Territorio.* 2015, 22.
6. Chuai, X.; Lu, Q.; Huang, X.; Gao, R.; Zhao, R. China's construction industry-linked economy-resources-environment flow in international trade. *J. Clean. Prod.* 2021, 278, 123990. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123990>.
7. Cueva, J. I. Nuevo modelo de habitar: Propuesta de multifamiliar en la ciudad de Cuenca para reducir la expansión urbana indiscriminada. *Univ. Católica de Cuenca* 2024. <https://doi.org/10.17298/ucacue>.
8. Dascalaki, E.; Argiropoulou, P.; Balaras, C.; Droutsas, K.; Kontoyiannidis, S. Analysis of the embodied energy of construction materials in the life cycle assessment of Hellenic residential buildings. *Energy Build.* 2021, 232, 110651. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110651>.
9. Dieter, N. El método comparativo. En S. Barquera, A. Herminio, *Antologías para el estudio y la enseñanza de la ciencia política. Volumen III: La metodología de la ciencia política.* Inst. Invest. Jurídicas UNAM 2020. <https://doi.org/10.18543/y2lh7foq>.
10. Dixit, M. Life cycle embodied energy analysis of residential buildings: A review of literature to investigate embodied energy parameters. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 79, 390–413. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.051>.
11. Dixit, M. Life cycle recurrent embodied energy calculation of buildings: A review. *J. Clean. Prod.* 2019, 209, 731–754. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.230>.
12. Dixit, M. K.; Fernández-Solís, J.; Lavy, S.; Culp, C. Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review. *Energy Build.* 2010, 42, 1238–1247. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.02.016>.
13. Donoso Correa, M. E. Critical analysis of the urban planning of the City of Cuenca. *Maskana* 2016, 7, 107–122. <https://doi.org/10.18537/mskn.07.01.11>.
14. GAD Municipal de Cuenca. Ordenanza de control para el suelo urbano, suelo rural y suelo rural de expansión urbana del canton Cuenca. *GAD Municipal de Cuenca* 2021. <https://doi.org/10.17298/cuenca.gob>.
15. Gago Lorenzo, P. Reflexiones sobre el derecho a la vivienda en el Ecuador: Una revisión desde la realidad urbana y el derecho a la ciudad. *Ciudad Desarro. Local Gob. Polít. Pública* 2008.

16. Garcia Punhagui, K. Potencial de redução das emissões de CO₂ e da energia incorporada na construção de moradias no Brasil mediante o incremento do uso de madeira. Doctoral Thesis, Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, 2014. <https://doi.org/10.11606/T.3.2014.tde-29042015-164644>.
17. Hermida, A.; Hermida, C.; Cabrera, N.; Calle, C. La densidad urbana como variable de análisis de la ciudad. El caso de Cuenca, Ecuador. *EURE* 2015, 25–44.
18. INEC. Boletín Técnico Estadísticas de Edificaciones (ESED) 2022. Instituto Nacional de Estadística y Censos, Ecuador 2023. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec>.
19. INEC. Boletín Técnico Estadísticas de Edificaciones (ESED) 2023. Instituto Nacional de Estadística y Censos, Ecuador 2024. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec>.
20. Lukić, I.; Premrov, M.; Alexander, A.; Leskovar, V. Embodied energy and GHG emissions of residential multi-storey timber buildings by height – A case with structural connectors and mechanical fasteners. *Energy Build.* 2021, 252, 111387. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111387>.
21. Menzies, G.; Turan, S.; Banfill, P. Life-cycle assessment and embodied energy: a review. *Constr. Mater.* 2007, 160, 135–143.
22. Moscoso García, P.; Quesada Molina, F. Analysis of Passive Strategies in Traditional Vernacular Architecture. *Build.* 2023, 13, 81984. <https://doi.org/10.3390/buildings13081984>.
23. ONU. World Population Prospects 2024: Summary of Results. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division 2024.
24. Pakdel, A.; Ayatollahi, H.; Sattary, S. Embodied energy and CO₂ emissions of life cycle assessment (LCA) in the traditional and contemporary Iranian construction systems. *J. Build. Eng.* 2021, 39, 102310. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102310>.
25. Praseeda, K.; Venkatarama Reddy, B.; Mani, M. Embodied and operational energy of urban residential buildings in India. *Energy Build.* 2016, 110, 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.072>.
26. Ramon, F. Sector inmobiliario en Cuenca, el antes y después de la pandemia. *El Mercurio* 2022, 30.
27. Sartori, I.; Hestnes, A. Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *Energy Build.* 2007, 39, 249–257. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.001>.
28. Shadram, F.; Mukkavaara, J. Exploring the effects of several energy efficiency measures on the embodied/operational energy trade-off: A case study of Swedish residential buildings. *Energy Build.* 2019, 183, 283–296. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.026>.
29. Shadram, F.; Johansson, T. D.; Lu, W.; Schade, J.; Olofsson, T. An integrated BIM-based framework for minimizing embodied energy during building design. *Energy Build.* 2016, 128, 592–604. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.007>.
30. Stephan, A.; Athanassiadis, A. Towards a more circular construction sector: Estimating and spatialising current and future non-structural material replacement flows to maintain urban building stocks. *Resour. Conserv. Recycl.* 2018, 129, 248–262. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.022>.
31. Terrádez Salom, D. La vivienda como derecho fundamental. Compromisos internacionales más allá del principio rector. *Estud. Deusto* 2024, 72, 369–402. <https://doi.org/10.18543/ed.3110>.
32. Torres Quezada, J. Comportamiento térmico de la cubierta en un clima cálido húmedo: repercusión energética en el edificio. *Esc. Téc. Super. Arquit. Barcelona_ETSAB*
33. Torres Quezada, J.; Torres Avilés, A. The Construction Evolution and Their Energetic Impact in Andean Region Buildings. *Green Energy and Technology*. Springer, Cham. 2023, 1–48. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21598-8_1.

34. Torres Quezada, J.; Torres Avilés, A.; Isalgué, A.; Pagés Ramón, A. The evolution of embodied energy in Andean residential buildings: Methodology applied to Cuenca-Ecuador. *Energy Build.* 2022, 259, 111858. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111858>.
35. United Nations Human Settlements Programme. World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities. *United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat)*, 2022. Available online: unhabitat.org.



© 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>