UNEMI
UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

REPÚBLICA DEL ECUADOR

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

FACULTAD DE POSGRADOS

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN APLICADA Y/O DE DESARROLLO

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

MAGÍSTER EN ARQUITECTURA CON MENCIÓN EN DESARROLLO URBANÍSTICO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL

TEMA:

Análisis de ciclo de vida de materiales constructivos aplicados a una vivienda prototipo con energía solar y cubierta verde: contribuciones para el desarrollo de ciudades ecológicas

AUTOR:

KEVIN JOSUE JARA PEÑAFIEL

TUTOR:

JENNYFFER REBECA YEPEZ RAMIREZ

MILAGRO, 2026

Derechos de Autor

Sr. Dr.

Fabricio Guevara Viejó

Rector de la Universidad Estatal de Milagro

Presente.

Yo, **Kevin Josué Jara Peñafiel,** en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de este informe de investigación, mediante el presente documento, libre y voluntariamente cedo los derechos de Autor de este proyecto de desarrollo, que fue realizada como requisito previo para la obtención de mi Grado, de **Magíster en Arquitectura con Mención en Desarrollo Urbanístico y Ordenamiento Territorial**, como aporte a la Línea de Investigación **Desarrollo Local, Empresarial, Productivo y Sostenible** de conformidad con el Art. 114 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, concedo a favor de la Universidad Estatal de Milagro una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Conservo a mi favor todos los derechos de autor sobre la obra, establecidos en la normativa citada.

Así mismo, autorizo a la Universidad Estatal de Milagro para que realice la digitalización y publicación de este Proyecto de Investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

El autor declara que la obra objeto de la presente autorización es original en su forma de expresión y no infringe el derecho de autor de terceros, asumiendo la responsabilidad por cualquier reclamación que pudiera presentarse por esta causa y liberando a la Universidad de toda responsabilidad.

Milagro, **20 de septiembre del 2026**



KEVIN JOSUÉ JARA PEÑAFIEL

C.I.: 0942471723

Aprobación del Tutor del Trabajo de Titulación

Yo, **Jennyffer Rebeca Yepez Ramírez**, en mi calidad de tutor del trabajo de titulación, elaborado por **Kevin Josué Jara Peñafiel**, cuyo tema es **Análisis de ciclo de vida de materiales constructivos aplicados a una vivienda prototipo con energía solar y cubierta verde: contribuciones para el desarrollo de ciudades ecológicas**, que aporta a la Línea de Investigación **Desarrollo Local, Empresarial, Productivo y Sostenible**, previo a la obtención del Grado **Magíster en Arquitectura con Mención en Desarrollo Urbanístico y Ordenamiento Territorial**. Trabajo de titulación que consiste en una propuesta innovadora que contiene, como mínimo, una investigación exploratoria y diagnóstica, base conceptual, conclusiones y fuentes de consulta, considero que el mismo reúne los requisitos y méritos necesarios para ser sometido a la evaluación por parte del tribunal calificador que se designe, por lo que lo **APRUEBO**, a fin de que el trabajo sea habilitado para continuar con el proceso de titulación de la alternativa de Informe de Investigación de la Universidad Estatal de Milagro.

Milagro, 20 de septiembre del 2026

Firmado electrónicamente por:
JENNYFFER REBECA
YEPEZ RAMIREZ

JENNYFFER REBECA YEPEZ RAMIREZ

C.I.: 0928987544

UNEMI
UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

FACULTAD DE POSGRADO

ACTA DE SUSTENTACIÓN

MAESTRÍA EN ARQUITECTURA

En la Facultad de Posgrado de la Universidad Estatal de Milagro, a los dieciséis días del mes de noviembre del año dos mil veintiseis., siendo las 11:00 horas, de forma VIRTUAL comparece el/la maestrante, JARA PEÑAFIEL KEVIN JOSUE, a defender el Trabajo de Titulación denominado **" ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE MATERIALES CONSTRUCTIVOS APLICADOS A UNA VIVIENDA PROTOTIPO CON ENERGÍA SOLAR Y CUBIERTA VERDE: CONTRIBUCIONES PARA EL DESARROLLO DE CIUDADES ECOLÓGICAS"**, ante el Tribunal de Calificación integrado por: Diplomado QUISHPI CHOTO FRANKLIN ROBERTO, Presidente(a), VEGA GUIRACOCHA GABRIELA CATHERINE en calidad de Vocal; y, AVEMAÑAY LEMA SHEYLA ALEXANDRA que actúa como Secretario/a.

Una vez defendido el trabajo de titulación; examinado por los integrantes del Tribunal de Calificación, escuchada la defensa y las preguntas formuladas sobre el contenido del mismo al maestrante compareciente, durante el tiempo reglamentario, obtuvo las siguientes calificaciones:

TRABAJO DE TITULACION	**59.33**
DEFENSA ORAL	**39.67**
PROMEDIO	**99.00**
EQUIVALENTE	**EXCELENTE**

Para constancia de lo actuado firman en unidad de acto el Tribunal de Calificación, siendo las 12:00 horas.

Firmado electrónicamente por:
FRANKLIN ROBERTO QUISHPI CHOTO

DIPLOMADO QUISHPI CHOTO FRANKLIN ROBERTO

PRESIDENTE/A DEL TRIBUNAL

Firmado electrónicamente por:
GABRIELA CATHERINE VEGA GUIRACOCHA

VEGA GUIRACOCHA GABRIELA CATHERINE

VOCAL

Firmado electrónicamente por:
SHEYLA ALEXANDRA AVEMANAY LEMA

AVEMAÑAY LEMA SHEYLA ALEXANDRA

SECRETARIO/A DEL TRIBUNAL

Firmado electrónicamente por:
KEVIN JOSUE JARA PENAFIEL

JARA PEÑAFIEL KEVIN JOSUE

MAESTRANTE

Dedicatoria

Este trabajo lo dedico a mis padres y a mi esposa quienes me apoyaron en todo momento.

Agradecimientos

Agradezco a Dios de todo corazón por estar conmigo siempre y por concederme el ánimo, la fortaleza y la sabiduría para seguir avanzando en mi vida profesional.
A mi esposa quien siempre estaba pendiente en cada paso que daba; a mi familia por acompañarme durante este proceso y estar siempre atentos a mi progreso; y a mis amigos quienes me brindaban sus consejos para seguir adelante.

Resumen

Este estudio tuvo como objetivo general analizar el impacto ambiental de distintos materiales constructivos aplicados a una vivienda prototipo con energía solar y cubierta verde, con el fin de valorar su aporte al desarrollo de ciudades ecológicas. Para ello se trabajó con tres frentes complementarios: una comparación de análisis de ciclo de vida con datos secundarios para 165 m^2 de muros, la estimación del consumo y dimensionamiento de un sistema fotovoltaico autónomo, y la evaluación del potencial de cubiertas verdes mediante SIG e Índice Verde Urbano (IVU). En el componente material, los resultados mostraron que no existe un material ganador en todos los indicadores: el bloque de hormigón convencional presentó la menor huella de carbono total, mientras que el bloque de tierra comprimida estabilizado con cal (BTC) mantuvo mejor desempeño en energía incorporada frente a opciones convencionales, por lo que se consideró una alternativa coherente con el enfoque sostenible del prototipo. En el plano energético, la vivienda registró una demanda estimada de 4254 Wh/día, cubierta técnicamente con un sistema autónomo de 10 paneles; sin embargo, su viabilidad práctica sigue condicionada por la inversión inicial, especialmente por el costo de baterías ($2277), gastos extra ($2000) y mano de obra ($1300), dentro de un total referencial de $7758,04. En el componente urbano, el análisis de 114 techos digitalizados identificó 8453,79 m^2 aptos para cubiertas verdes; aun en el escenario de adopción total, el IVU solo aumentó de 1,38 a 1,43 m^2/hab, lo que confirma un aporte positivo pero limitado a escala cantonal. En términos prácticos, el estudio muestra que la sostenibilidad de la vivienda mejora cuando materiales, energía y vegetación se diseñan de forma integrada. Su aporte novedoso radica justamente en articular estas tres escalas en una sola propuesta aplicada al contexto de Milagro.

Como principal limitación, la comparación ambiental de materiales se construyó con datos secundarios de estudios distintos, por lo que los resultados deben leerse con cautela. Además, la evaluación energética fue estimada y el análisis de cubiertas verdes se desarrolló en un sector piloto, no sobre la totalidad del cantón.

Palabras clave: Análisis de ciclo de vida, materiales constructivos sostenibles, energía solar fotovoltaica, cubiertas verdes, índice verde urbano, vivienda sostenible.

Abstract

The overall objective of this study was to analyze the environmental impact of different building materials used in a prototype home with solar power and a green roof, in order to assess their contribution to the development of eco-friendly cities. To this end, the study addressed three complementary areas: a life cycle assessment comparison using secondary data for 165 m^2 of walls; the estimation of energy consumption and sizing of an off-grid photovoltaic system; and the evaluation of green roof potential using GIS and the Urban Green Index (UGI). Regarding materials, the results showed that no single material outperformed others across all indicators: conventional concrete blocks had the lowest total carbon footprint, while lime-stabilized compressed earth blocks (BTC) performed better in terms of embodied energy compared to conventional options, and were therefore considered a viable alternative consistent with the prototype's sustainable approach. In terms of energy, the home had an estimated demand of 4,254 Wh/day, which was technically met by an off-grid system consisting of 10 panels; however, its practical feasibility remains constrained by the initial investment, particularly the cost of batteries ($2,277), additional expenses ($2,000), and labor ($1,300), for a total reference cost of $7,758.04. On the urban front, an analysis of 114 digitized rooftops identified 8,453.79 m^2 suitable for green roofs; even in a scenario of full adoption, the IVU increased only from 1.38 to 1.43 m^2/resident, confirming a positive but limited contribution at the cantonal level. In practical terms, the study shows that housing sustainability improves when materials, energy, and vegetation are designed in an integrated manner. Its innovative contribution lies precisely in articulating these three scales into a single proposal applied to the context of Milagro.

The main limitation is that the environmental comparison of materials was based on secondary data from various studies, so the results should be interpreted with caution. Furthermore, the energy assessment was an estimate, and the analysis of green roofs was conducted in a pilot area, not across the entire canton.

Keywords: Life cycle assessment, sustainable building materials, solar photovoltaics, green roofs, urban green index, sustainable housing.

Lista de Figuras

Figura 1 Plano de la vivienda prototipo (como base de ejemplo)..... 42
Figura 2 Comparación de los impactos ambientales totales para la vivienda prototipo 45
Figura 3 Bloque de tierra comprimida con cal elaborados para el prototipo 46
Figura 4 Techo con el arreglo de los módulos fotovoltaicos sistema autónomo..... 52
Figura 5 Distribución espacial de áreas verdes urbanas en la ciudad de Milagro 56
Figura 6 Área piloto (5 manzanas) en Milagro con los techos digitalizados para posibles cubiertas verdes..... 57
Figura 7 Vivienda prototipo sostenible analizada..... 60

Lista de Tablas

Tabla 1 Variables y sus ejes de ejecución 10
Tabla 2 Impactos unitarios reportados en la literatura 40
Tabla 3 Total de bloques de cada material 43
Tabla 4 Impactos totales para la vivienda prototipo 44
Tabla 5 Consumo energético de la vivienda prototipo 47
Tabla 6 Especificaciones técnicas de los componentes para el cálculo 48
Tabla 7 Producción energética estimada para los escenarios fotovoltaicos analizados 51
Tabla 8 Costos referenciales del sistema fotovoltaico autónomo. 54
Tabla 9 Resumen del IVU calculado para Milagro 56
Tabla 10 Características del área piloto para cubiertas verdes. 57
Tabla 11 Escenarios de aporte de cubiertas verdes y efectos sobre el IVU. 58

Índice / Sumario

Introducción 1
Contexto y relevancia del estudio 1
Planteamiento del estudio y diseño teórico metodológico 4
Organización del estudio 5
CAPÍTULO I: El Problema de la Investigación 6
1.1. Planteamiento del problema 6
1.2. Delimitación del problema 6
1.3. Formulación del problema 7
1.4. Preguntas de investigación 7
1.5. Objetivos 7
1.5.1. Objetivo general 7
1.5.2. Objetivos específicos 8
1.6. Hipótesis 8
1.7. Justificación y Sustento 8
1.8. Declaración de las variables (Operacionalización) 9
CAPÍTULO II: Marco Teórico Referencial 11
2.1. Antecedentes Referenciales 11
2.1.1. Estudios sobre análisis de ciclo de vida de materiales constructivos 11
2.1.2. Investigaciones sobre cubiertas verdes y eficiencia energética 13
2.1.3. Investigaciones sobre energía solar en viviendas 14
2.1.4. Investigaciones sobre índice verde urbano e infraestructura verde 16
2.1.5. Vacío de conocimiento y justificación del estudio 18
2.2. Marco Conceptual 19
2.2.1. Alcance conceptual del estudio 19
2.2.2. Estrategias constructivas sostenibles 20
2.2.3. Desempeño ambiental de la vivienda prototipo 22
2.2.4. Indicadores ambientales de evaluación 24
2.2.5. Síntesis conceptual del estudio 25
2.3. Marco Teórico 25
2.3.1. Desarrollo urbano sostenible y ciudades ecológicas 25
2.3.2. Arquitectura sostenible y vivienda prototipo 27
2.3.3. Análisis de ciclo de vida en el sector de la construcción 29
2.3.4. Materiales constructivos y desempeño ambiental 31
2.3.5. Cubiertas verdes y sistemas fotovoltaicos 32
2.3.6. Índice Verde Urbano y análisis espacial con SIG 33
2.3.7. Posicionamiento teórico 35

CAPÍTULO III: Diseño Metodológico 36
3.1. Tipo y diseño de investigación 36
3.2. La población y la muestra 36
3.3. Los métodos y las técnicas 37
3.4. Procesamiento estadístico de la información 39
CAPÍTULO IV: Análisis e Interpretación de Resultados 40
4.1. Análisis e Interpretación de Resultados 40
4.1.1. Comparación ambiental de los materiales constructivos 40
4.1.2. Evaluación energética 47
4.1.3. Estimación referencial de costos del sistema fotovoltaico 54
4.1.4. Diagnóstico del Índice Verde Urbano y cubiertas verdes 55
4.1.5. Área piloto de cubiertas verdes 57
4.1.6. Escenarios de adopción de cubiertas verdes 58
4.1.7. Síntesis integrada de resultados 59
CAPÍTULO V: Conclusiones, Discusión y Recomendaciones 61
5.1. Discusión 61
5.2. Conclusiones 65
5.3. Recomendaciones 67
5.3.1. Limitaciones del estudio 67
5.3.2. Recomendaciones prácticas y de investigación 68
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 71

Introducción

Contexto y relevancia del estudio

Hoy, hablar de sostenibilidad en arquitectura y urbanismo ya no implica mirar solo el consumo energético de los edificios durante su uso. El problema es más amplio: también involucra los materiales, los procesos constructivos y la manera en que las edificaciones se relacionan con la ciudad. En ese marco, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y la Global Alliance for Buildings and Construction advierten que el sector de la edificación y la construcción consume el 32 % de la energía global y genera el 34 % de las emisiones mundiales de CO_2. A ello se suma lo señalado por la Agencia Internacional de la Energía, que atribuye únicamente a la operación de los edificios el 30 % del consumo final de energía y el 26 % de las emisiones asociadas a la energía. En conjunto, estas cifras explican por qué la vivienda y la materialidad constructiva ocupan actualmente un lugar central en la agenda ambiental internacional (Environment, 2025).

Junto con esa presión ambiental aparece otro problema que en muchas ciudades ya es difícil de ignorar: la pérdida de coberturas vegetales y su reemplazo por superficies duras, impermeables y con alta absorción térmica. Ese proceso ha contribuido al aumento de las islas de calor urbanas. La EPA señala que, en ciudades de un millón de habitantes o más, la temperatura media anual del aire puede situarse entre 1 y 12 °C por encima de la registrada en áreas rurales cercanas, con efectos directos sobre la demanda de energía, los costos de enfriamiento, la contaminación del aire y la salud. En la misma dirección, el IPCC reconoce que la infraestructura verde urbana, entre ella techos verdes, arbolado y superficies permeables, puede disminuir la demanda energética, mitigar el efecto de isla de calor y aportar beneficios simultáneos en adaptación climática y bienestar urbano (EPA, 2019).

Dentro de este escenario, la vivienda adquiere un papel estratégico, especialmente en contextos cálidos donde el confort térmico suele resolverse mediante mayor consumo

eléctrico. La selección del material constructivo influye directamente en la energía incorporada, la huella de carbono y el comportamiento térmico de la envolvente. En Ecuador, una investigación desarrollada en Cuenca sobre ladrillo semimecanizado reportó que, a escala de unidad, su fabricación consume 9,33 MJ y emite 1,041 kg de CO_2 en un análisis cuna a puerta. Este tipo de evidencia confirma que los materiales convencionales no solo tienen implicaciones técnicas y económicas, sino también ambientales, por lo que su evaluación resulta indispensable cuando se busca proyectar viviendas sostenibles (Venegas Tomalá, 2018).

Como respuesta a este problema, distintos estudios han comenzado a mirar con mayor atención materiales de menor impacto, de origen local o asociados a enfoques de economía circular. En la construcción con tierra, por ejemplo, Cardoso presentó una propuesta de vivienda unifamiliar sustentable con bloques de tierra comprimida, resaltando el uso de recursos locales, el análisis bioclimático y la intención de reducir impactos ambientales y consumo energético. En una línea similar, Cabrera, González y Mingolla sostienen que el uso de tierra en forma de BTC puede disminuir la impronta energética de la construcción y comparan cualitativamente su ciclo de vida con otros materiales de uso frecuente. A esto se suma el análisis comparativo publicado en la Revista de Arquitectura, donde se observa que adobe, BTC, tapia y quincha presentan un comportamiento térmico relevante y continúan siendo materiales pertinentes para una lectura contemporánea del desempeño y la sostenibilidad (Cardoso, 2020).

Junto a estas alternativas, también se han estudiado unidades constructivas elaboradas con plástico reciclado. La investigación publicada en la revista Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo, al comparar ladrillos tradicionales con ladrillos PET, muestra que este campo todavía se encuentra en desarrollo y que buena parte de la evidencia disponible sigue concentrándose en la caracterización técnica, la resistencia y la viabilidad de uso. Por ello, aunque los materiales reciclados representan una línea prometedora, aún se requiere evaluarlos con metodologías más integrales que consideren no solo su desempeño mecánico,

sino también su impacto ambiental y su pertinencia dentro de propuestas reales de vivienda sostenible (Ortiz-Castellanos et al., 2020).

La sostenibilidad de la vivienda, sin embargo, no depende solo del material elegido. La literatura reciente muestra que las cubiertas verdes y otras soluciones basadas en la naturaleza pueden mejorar el comportamiento térmico del edificio y, al mismo tiempo, aportar a la calidad ambiental urbana. El IPCC incluye expresamente a los techos verdes dentro de la infraestructura verde urbana con capacidad para disminuir la demanda de energía y el estrés térmico. A su vez, una revisión sistemática publicada en 2025 concluye que las cubiertas verdes mejoran el confort térmico, favorecen la eficiencia energética y refuerzan su papel como estrategia de adaptación climática en áreas densamente urbanizadas. Esa misma revisión, además, destaca el potencial de los sistemas híbridos que combinan cubierta verde y paneles fotovoltaicos, cuestión especialmente pertinente para un estudio como este, que busca integrar estrategias pasivas y activas en una sola vivienda prototipo (IPCC, 2022).

Llevado a la escala urbana, el análisis quedaría incompleto si no se considera la disponibilidad de áreas verdes y su relación con la sostenibilidad territorial. En Ecuador, el Índice Verde Urbano constituye un indicador oficial promovido por el INEC para apoyar políticas de desarrollo urbano orientadas a equilibrar crecimiento y ambiente. Su utilidad radica en que aporta información relevante para evaluar la calidad ambiental urbana y para planificar el territorio, al facilitar la lectura de la relación entre crecimiento urbano, áreas verdes y bienestar de la comunidad (INEC, 2012a).

En este contexto, el cantón Milagro aparece como un caso de estudio pertinente. Su realidad urbana, el predominio de soluciones constructivas convencionales y la necesidad de replantear la vivienda desde criterios ambientales y urbanísticos justifican una propuesta que no se limite a comparar materiales de forma aislada. En este estudio interesa comprender de qué manera un conjunto de estrategias constructivas sostenibles puede modificar el desempeño ambiental de una vivienda prototipo y, al mismo tiempo, aportar de forma

potencial al desarrollo urbano sostenible.

Planteamiento del estudio y diseño teórico metodológico

A partir de esta problemática, la investigación se organiza en torno a dos variables principales. La variable independiente corresponde a las estrategias constructivas sostenibles, entendidas aquí como la combinación de materiales alternativos, una cubierta verde y un sistema fotovoltaico. La variable dependiente es el desempeño ambiental de la vivienda prototipo, valorado mediante indicadores derivados del análisis de ciclo de vida y complementado con el examen de su aporte potencial al desarrollo urbano sostenible. Desde esta perspectiva, el problema no se reduce a decidir qué material conviene más, sino a comprender cómo determinadas decisiones de diseño y construcción pueden traducirse en menores impactos ambientales y en una relación más equilibrada entre vivienda y ciudad.

En el plano teórico, este estudio articula cinco campos que hoy necesitan dialogar entre sí. El primero es el desarrollo urbano sostenible, como marco para pensar ciudades más resilientes y ecológicas. El segundo es la vivienda sostenible, entendida como la escala arquitectónica donde se concretan decisiones materiales, energéticas y bioclimáticas. El tercero es el análisis de ciclo de vida, reconocido por las normas ISO 14040 e ISO 14044 como herramienta para estructurar el objetivo y alcance, el inventario, la evaluación de impactos y la interpretación de resultados. El cuarto es la infraestructura verde urbana, dentro de la cual la cubierta vegetal deja de ser solo una solución constructiva para adquirir también valor urbano. El quinto es el Índice Verde Urbano, que permite vincular el caso de estudio con una discusión territorial más amplia.

En términos metodológicos, la investigación se ubica en un enfoque cuantitativo, con alcance explicativo y diseño no experimental. Se trabajará con un estudio comparativo aplicado a una vivienda prototipo sostenible, en la que se analizarán cinco alternativas de material para envolvente o mampostería: ladrillo cocido, bloque de hormigón con áridos naturales, bloque con áridos reciclados y bloque de tierra comprimida estabilizado con cal y cemento. A esta

base se sumarán dos estrategias complementarias: una cubierta verde y un sistema fotovoltaico. El desempeño ambiental se evaluará mediante análisis de ciclo de vida, tomando como referencia los lineamientos de ISO 14040 e ISO 14044, con el fin de estimar indicadores como huella de carbono, energía incorporada y otros impactos relevantes. Después, se examinará el aporte potencial de la cubierta verde al Índice Verde Urbano, de modo que el caso arquitectónico pueda leerse también desde la escala urbana (ISO, 2020).

El vacío que esta investigación busca atender se hace visible justamente en la revisión de antecedentes. Existen estudios centrados en el BTC y en los materiales de tierra, otros dedicados al ACV de materiales convencionales, otros enfocados en el desempeño térmico de las cubiertas verdes y otros en el análisis del Índice Verde Urbano. Sin embargo, cuando esta literatura se revisa en conjunto, se observa que todavía son escasos los trabajos que integran todos estos componentes en una sola propuesta de vivienda prototipo y que, además, examinan su posible contribución al desarrollo urbano sostenible desde un caso aplicado en Ecuador. En esa articulación se encuentra el aporte específico de este trabajo (Cardoso, 2020).

Organización del estudio

La tesina está organizada en cinco capítulos. El primero desarrolla el problema de investigación, la justificación, los objetivos, la hipótesis y la definición de variables. El segundo presenta el marco teórico y el estado del arte, con énfasis en desarrollo urbano sostenible, vivienda sostenible, materiales constructivos alternativos, análisis de ciclo de vida, cubiertas verdes, energía solar e Índice Verde Urbano. El tercero expone la metodología, especificando el enfoque, el tipo y diseño de investigación, la construcción conceptual del prototipo de vivienda, el procedimiento de análisis comparativo y los criterios utilizados para la evaluación ambiental y urbana. El cuarto se orienta a la presentación, análisis e interpretación de resultados. Finalmente, el quinto recoge las conclusiones, las limitaciones del estudio y las recomendaciones para futuras investigaciones o para su posible aplicación en contextos locales.

CAPÍTULO I: El Problema de la Investigación

1.1. Planteamiento del problema

En la Costa ecuatoriana, altas temperaturas y fuerte radiación solar, junto con escasa cobertura vegetal urbana, intensifican el efecto de isla de calor, elevando el uso de aire acondicionado y el consumo de agua en las viviendas. La mayoría de hogares depende únicamente de la red eléctrica convencional, incrementando su huella de emisiones; al mismo tiempo, los materiales constructivos comunes (ladrillo cocido, hormigón) implican alta energía incorporada. Estudios recientes señalan que el Bloque de Tierra Comprimida (BTC) estabilizado requiere mucha menos energía para su fabricación que los materiales tradicionales. En Milagro (cantón de clima cálido en Guayas) el Índice Verde Urbano es críticamente bajo (0.82 m²/hab), según datos analizados por el INEC a la fecha del año 2012, muy por debajo del mínimo de 9 m² recomendado por la OMS (INEC, 2012a). No obstante, no existe un análisis integrado que compare el ciclo de vida (ISO 14040/44) de al menos tres materiales (incluido BTC) en una vivienda con tecnologías bioclimáticas (techo verde, paneles solares) y evalúe su aporte potencial al desarrollo sostenible de Milagro.

1.2. Delimitación del problema

El estudio se centrará en un prototipo de vivienda sostenible en el cantón Milagro, provincia del Guayas, tomando en cuenta las condiciones climáticas de la Costa ecuatoriana. Temporalmente se emplearán datos y estudios recientes sobre clima local, consumos energéticos e índices ambientales, así como fuentes bibliográficas y normativas actualizadas. Temáticamente, la investigación abarcará el Análisis de Ciclo de Vida (según normas ISO 14040/44) de tres materiales constructivos (por ejemplo, BTC estabilizado, ladrillo de arcilla y un bloque alternativo reciclado), junto con estrategias de diseño bioclimático (sistema fotovoltaico y cubierta vegetal). Se considerará también el Índice Verde Urbano local como indicador de sostenibilidad urbana. Quedan fuera de alcance las tecnologías o escalas distintas de la vivienda prototipo y el ámbito urbano de Milagro.

1.3. Formulación del problema

¿Cómo influye la combinación de materiales de construcción sostenibles y de bajo impacto (por ejemplo, BTC frente a ladrillo tradicional y otro material alternativo), junto con la implementación de energía solar fotovoltaica y una cubierta verde, en el desempeño ambiental de una vivienda prototipo en Milagro, y cuál sería su aporte potencial al incremento del Índice Verde Urbano del cantón?

1.4. Preguntas de investigación

Pregunta principal: ¿Qué combinación de materiales constructivos y estrategias bioclimáticas (techo verde y panel solar) minimiza el impacto ambiental de una vivienda prototipo en Milagro según un ACV conforme a ISO 14040/44, y cómo repercute esto en el Índice Verde Urbano local?

Preguntas secundarias: (1) ¿Cuál es el impacto ambiental (huella de carbono, energía incorporada, consumo hídrico) asociado al ciclo de vida de la vivienda usando cada combinación de materiales (p. ej. BTC, ladrillo cocido, bloque reciclado) con su estabilizador correspondiente? **(2)** ¿En qué medida reduce el consumo eléctrico y las emisiones la integración de paneles solares fotovoltaicos en el prototipo, en comparación con un diseño convencional sin renovables? **(3)** ¿Qué mejora en el confort térmico (temperatura interior/exterior) y en el ahorro de agua aporta la cubierta verde, dados los parámetros climáticos de Milagro? **(4)** ¿Cuál es el Índice Verde Urbano actual de Milagro y cuánto podría aumentar con la adopción de estas viviendas con cubierta vegetal, en términos de área verde per cápita?

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Analizar el impacto ambiental de distintos materiales constructivos en una vivienda prototipo sostenible equipada con paneles solares y cubierta verde, y determinar cómo su aplicación contribuye a la mitigación de impactos ambientales urbanos y al desarrollo de ciudades ecológicas en la Costa ecuatoriana.

1.5.2. Objetivos específicos

- Realizar una comparativa del Análisis de Ciclo de Vida de los materiales constructivos (ladrillo cocido; bloque de hormigón con áridos naturales; bloque de hormigón con áridos reciclados; BTC con cal; BTC con cemento ordinario) en la fase de construcción del bloque para la vivienda prototipo, calculando sus huellas de carbono y energía incorporada.
- Calcular el desempeño energético operativo de la vivienda prototipo con paneles solares fotovoltaicos instalados en el tejado, evaluando la producción de energía anual y la reducción de consumo a la red eléctrica.
- Determinar el déficit de áreas en el cantón Milagro (m² de áreas verdes por habitante) comparando con el valor de referencia internacional de 9 m²/hab según la OMS, estimando cuantitativamente cuánto aumentaría dicho índice si se implementaran cubiertas verdes en las viviendas prototipo estudiadas y en otras proyectadas, evaluando su potencial aporte a la mejora del IVU local.

1.6. Hipótesis

La hipótesis central de este estudio es que una vivienda prototipo sostenible, que utilice materiales constructivos de bajo impacto ambiental junto con sistemas bioclimáticos (cubierta verde y paneles solares), presentará un desempeño ambiental significativamente mejor (menor huella de carbono, menor consumo de energía, etc.) y contribuirá positivamente al Índice Verde Urbano (IVU) del cantón Milagro. Es decir, se espera que la combinación de estas estrategias constructivas reduzca las emisiones globales del edificio y aumente la superficie verde disponible en la ciudad, siguiendo los parámetros recomendados por organismos internacionales. Esta hipótesis es comprobable mediante el cálculo de indicadores ambientales (kg CO_2-equivalente, MJ, kWh, etc.) por ACV y la estimación del IVU usando datos locales de Milagro.

1.7. Justificación y Sustento

Ambiental: El sector de la construcción es uno de los más contaminantes: consume

cerca del 32 % de la energía global y genera aproximadamente el 34 % de las emisiones mundiales de CO_2, además de un tercio de los residuos globales. Este estudio aporta alternativas para reducir ese impacto en la escala local de Milagro, promoviendo materiales (BTC, ladrillo, hormigón) y sistemas (solar, cubiertas verdes) que, según el ACV, pueden disminuir la carga ambiental de las edificaciones. El análisis de ciclo de vida (ACV) es la herramienta estándar para cuantificar estas reducciones.

Científica: Integrase dos líneas de investigación poco combinadas: por un lado, evaluación ambiental de materiales de construcción (ACV según ISO 14040), y por otro, estrategias bioclimáticas en vivienda urbana. No existen muchos estudios que analicen simultáneamente el ciclo de vida de materiales junto con cubiertas verdes y energía solar en un contexto urbano concreto. El proyecto llena este vacío metodológico, aportando datos nuevos sobre cómo estas medidas conjuntas influyen en la sostenibilidad de las edificaciones y en indicadores urbanos (IVU).

Social: Mejora la calidad de vida y el confort térmico de los habitantes. Las cubiertas verdes actúan como aislante natural, reducen el efecto “isla de calor” y mejoran el aire, en línea con recomendaciones de salud pública (OMS sugiere 9–15 m² de áreas verdes por persona). Al aumentar el espacio verde per cápita en Milagro, se favorece el bienestar urbano y la resiliencia climática de la comunidad.

Práctica: Proporciona información útil para autoridades y profesionales. Los resultados servirán para guiar diseños de vivienda sostenible en Milagro (y ciudades similares), optimizar el uso de materiales ecoeficientes y proyectar metas de cubierta verde urbana. Además, al cuantificar aportes al IVU, se apoya la planificación municipal de espacios verdes. La aplicación de esta metodología podrá adaptarse en futuras licitaciones públicas o certificaciones ambientales de proyectos de vivienda.

1.8. Declaración de las variables (Operacionalización)

Se identifican dos variables principales: Estrategias constructivas sostenibles

(independiente) y Desempeño ambiental de la vivienda prototipo (dependiente). La matriz siguiente operacionaliza cada variable:

Tabla 1

Variables y sus ejes de ejecución

Variable	Definición conceptual	Definición operativa	Dimensiones	Indicadores	Unidad de medida	Técnica/Instrumento
Estrategias constructivas sostenibles *(Independiente)*	Conjunto de materiales y tecnologías aplicados en la vivienda con bajo impacto ambiental (materiales locales/reciclados) que buscan eficiencia ecológica.	Caracterización de los componentes del prototipo: materiales constructivos empleados (BTC con cal, ladrillo, bloque plástico reciclado), cubierta verde y sistema fotovoltaico utilizados.	*Material: tipo de material, uso de estabilizador Cubierta verde: presencia y área Solar: potencia instalada*	Material: Categoría (BTC, ladrillo, plástico) Cubierta: Superficie verde (m²) Fotovoltaico: Potencia (kWp)	m² kW	Prototipo de la vivienda, Base de datos de inventario (ACV); especificaciones de proveedor.
Desempeño ambiental de la vivienda prototipo *(Dependiente)*	Evaluación de los impactos y uso de recursos asociado al ciclo de vida de la vivienda, considerando tanto su operación como su contribución a la ciudad.	Cálculo de indicadores, acv de los materiales según ISO 14040: emisiones (kg CO_2e), energía incorporada (MJ), consumo energético anual (kWh). También se incluye la contribución urbana a través del IVU.	*Impacto ACV: emisiones y energía Demanda energética: consumo uso Contribución urbana: espacio verde generado*	Huella de carbono: kg CO_2-eq Energía incorporada: MJ Consumo energético: kWh/año IVU: Índice (m² verdes por habitante)	kg CO_2-eq MJ kWh/año	ACV (base de datos); Análisis energético (caso práctico); cálculo de IVU (cartografía GIS, datos censales).

Nota. Elaboración propia.

CAPÍTULO II: Marco Teórico Referencial

2.1. Antecedentes Referenciales

2.1.1. Estudios sobre análisis de ciclo de vida de materiales constructivos

Un primer grupo de antecedentes se ubica en el análisis de ciclo de vida de materiales constructivos. En este campo, uno de los aportes nacionales más relevantes es la tesis de Venegas Tomalá (2018), que evaluó la energía contenida, las emisiones de CO_2 y el material particulado en la fabricación del ladrillo semimecanizado tochano. El valor de ese trabajo no está solo en el dato cuantitativo, sino en que delimita con claridad su alcance metodológico como un análisis “puerta a puerta”, incorporando el transporte indirecto de materia prima. El estudio reportó un consumo de 9,33 MJ y una emisión de 1,041 kg de CO_2 por unidad de ladrillo, lo que confirma que la fabricación del ladrillo cocido constituye un punto crítico desde el punto de vista ambiental. Para esta tesina, ese antecedente resulta especialmente útil porque ofrece una base local y verificable para comprender el desempeño ambiental del ladrillo convencional y luego contrastarlo con materiales alternativos.

Frente al ladrillo cocido, la literatura sobre construcción con tierra comprimida muestra que los bloques de tierra comprimida, especialmente cuando se estabilizan con porcentajes controlados de cal y cemento, pueden alcanzar desempeños mecánicos adecuados con menores cargas ambientales. S. Cabrera et al. (2020) evaluaron doce series de BTC estabilizados mediante ACV y ensayos de resistencia a compresión. Su aporte es importante porque no se limita a presentar la tierra como un material “ecológico”, sino que busca relacionar el impacto ambiental con el comportamiento técnico del bloque. Algo parecido ocurre con el trabajo presentado por Cabrera et al. (2021) en EuroELECS, donde se analiza cualitativamente el ciclo de vida del BTC y se sostiene que su energía incorporada es considerablemente menor que la del bloque de hormigón y la del ladrillo cerámico cocido. En conjunto, estos estudios permiten entender que el BTC no debe verse solo como una

alternativa tradicional, sino como una opción técnicamente viable dentro de una búsqueda actual por reducir energía incorporada y emisiones desde la selección del material.

La revisión internacional refuerza esta misma tendencia. Arduin et al. (2022), en una revisión sistemática sobre ACV en construcción con tierra, identificaron 27 estudios y concluyeron que el contenido de aglutinantes y el transporte son dos de los factores que más influyen en el desempeño ambiental de estas técnicas. Esta observación resulta muy pertinente para la presente tesis, porque sugiere que la sostenibilidad de un material no depende únicamente de su naturaleza, sino también de su modo de producción, de los insumos adicionales que requiere y del grado de cercanía de su cadena de abastecimiento. De forma complementaria, Nouri et al. (2023) compararon tierra apisonada y ladrillo cocido en viviendas de bajo costo y encontraron que sustituir ladrillos cocidos por tierra apisonada podía reducir de manera marcada tanto las emisiones como la energía incorporada. En una línea similar, Dabaieh et al. (2020) compararon ladrillos de arcilla secados al sol con ladrillos cocidos y hallaron reducciones importantes de CO_2 y energía incorporada cuando se reemplaza la cocción por alternativas no cocidas. En conjunto, estos trabajos coinciden en un punto clave: la cocción intensiva y los procesos industriales con alta demanda energética siguen siendo factores centrales en el impacto ambiental de la mampostería convencional.

Otra vertiente que ha cobrado fuerza es la de los materiales reciclados o reinterpretados desde una lógica circular. La tesis de Cal Mouriño (2017), desarrollada en la Universidade da Coruña, resulta valiosa porque lleva la discusión del ACV al campo de la madera en construcción y demuestra que el análisis ambiental de los materiales no debe limitarse a los productos cerámicos o al hormigón, sino extenderse a otras soluciones constructivas y a sus cadenas de extracción, transformación, uso y disposición. Más recientemente, Yadav et al. (2024) revisaron la literatura sobre ladrillos fabricados con residuos plásticos y señalaron su potencial para reducir residuos, emisiones y consumo de recursos, aunque también advirtieron limitaciones relacionadas con durabilidad, aceptación normativa y seguridad estructural. En una aplicación más puntual, Prien (2024) desarrolló un

ACV de ladrillos con residuos plásticos y encontró que una composición con 90 % de arena y 10 % de PET presentaba el menor daño ambiental entre las configuraciones estudiadas. Estos antecedentes amplían el horizonte del problema, ya que muestran que las soluciones sostenibles en materiales no se restringen a la tierra estabilizada, sino que incluyen opciones recicladas cuyo desempeño depende del equilibrio entre beneficios ambientales, viabilidad técnica y condiciones de uso.

A partir de esta primera línea de revisión puede reconocerse un patrón bastante claro. Existen estudios sólidos que comparan materiales y cuantifican sus impactos, pero lo hacen desde unidades funcionales, escalas y límites de sistema diferentes. Venegas Tomalá (2018) trabaja por unidad de ladrillo y con un enfoque puerta a puerta; Dabaieh et al. (2020) toman como unidad mil ladrillos y consideran la cadena productiva relevante; Nouri et al. (2023) expresan los resultados por tonelada de material. Esa diversidad metodológica es comprensible, pero también dificulta traducir resultados dispersos en decisiones de diseño para una vivienda concreta. Precisamente allí aparece una de las necesidades que este estudio intenta atender: reunir esa evidencia previa y articularla con una propuesta comparativa aplicada a una vivienda prototipo.

2.1.2. Investigaciones sobre cubiertas verdes y eficiencia energética

Un segundo grupo de antecedentes se refiere a las cubiertas verdes y a su relación con la eficiencia energética. En este punto, la literatura resulta bastante consistente al señalar que las cubiertas vegetadas cumplen una doble función: mitigan el efecto de isla de calor urbana y mejoran el comportamiento térmico del edificio. La Environmental Protection Agency de los Estados Unidos resume estos beneficios de forma clara y sostiene que las cubiertas verdes reducen la temperatura superficial del techo, ayudan a disminuir la temperatura del aire circundante y pueden bajar de manera significativa la carga de enfriamiento. Además, la EPA destaca co-beneficios ambientales y sociales, entre ellos la gestión de escorrentía, la mejora del confort, la reducción de emisiones asociadas al aire acondicionado y el aumento

de la vida útil de la cubierta. Aunque se trata de una fuente institucional y no de un estudio de caso puntual, su aporte es valioso porque sintetiza evidencia acumulada y permite ubicar el tema dentro de una agenda actual de adaptación urbana al calor (US EPA, 2026).

En el ámbito académico latinoamericano, uno de los antecedentes más cercanos es el trabajo de Flores-Asin et al. (2016), publicado en Hábitat Sustentable. Los autores evaluaron el desempeño térmico de cubiertas verdes en ciudades áridas y encontraron que estas podían reducir en promedio 2 °C la temperatura interior, 8 °C la amplitud térmica y 6 °C la temperatura máxima interior durante la época estival. El interés de ese estudio no se limita a sus resultados, sino también a que se apoya en mediciones experimentales e introduce un criterio decisivo para contextos secos: la selección de especies vegetales de bajo consumo hídrico. Para la presente tesina, esto es importante porque evita asumir la cubierta verde como una solución universal y obliga a pensar su factibilidad según el clima, las especies, el mantenimiento y la disponibilidad de agua.

Más allá del edificio aislado, las cubiertas verdes han empezado a entenderse como parte de una red de infraestructura verde con capacidad para mejorar la resiliencia térmica urbana. Una revisión reciente sobre infraestructura verde y mitigación de islas de calor concluye que estas estrategias pueden disminuir las temperaturas superficiales y mejorar los índices de confort térmico exterior, especialmente cuando se combinan con otras soluciones, como el arbolado urbano y las fachadas vegetadas. Desde esta perspectiva, el aporte de una cubierta verde deja de limitarse al ahorro energético en la vivienda y pasa a formar parte de una lógica más amplia de renaturalización urbana. Ese cambio de enfoque resulta relevante para esta tesina porque permite vincular una decisión de diseño arquitectónico con una discusión urbana mayor, que después puede relacionarse con el índice verde urbano (Cuce et al., 2025).

2.1.3. Investigaciones sobre energía solar en viviendas

La tercera línea de antecedentes se centra en la energía solar aplicada a viviendas,

sobre todo desde la lógica de la generación distribuida y el autoconsumo. Una revisión de literatura sobre generación distribuida residencial en Sudamérica señala que la adopción de estos sistemas ha crecido de manera importante en la última década y que este avance ha estado impulsado por tres factores principales: políticas favorables, expansión de la tecnología fotovoltaica y abundancia del recurso solar en la región. Este antecedente resulta útil porque muestra que el interés por el uso residencial de energía solar no responde a una tendencia aislada, sino a una transformación regional que vincula sostenibilidad urbana, descentralización energética y menor dependencia de las redes convencionales (Chabla-Auqui et al., 2023).

En el caso ecuatoriano, el antecedente más sólido encontrado es el de de Tapia et al. (2022), quienes evaluaron el potencial fotovoltaico en techos de Quito, Guayaquil, Cuenca y Galápagos a partir de información SIG, irradiancia horaria y análisis económico. Los autores estimaron una superficie disponible cercana a 144 km^2 y una producción de 16,94 ± 3,38 TWh/año, cifra suficiente para cubrir casi el doble del consumo anual de las áreas estudiadas en 2019. Sin embargo, el propio trabajo advierte que la competitividad económica de la tecnología depende de las tarifas, de los escenarios financieros y de los incentivos existentes. Este hallazgo es especialmente importante para la presente investigación porque permite ver dos aspectos al mismo tiempo: que el potencial técnico existe, pero que la factibilidad de adopción no depende solo del recurso solar, sino también del contexto regulatorio y económico.

En una escala más cercana al ámbito doméstico, Castro et al. (2026) evaluaron la factibilidad económica de sistemas fotovoltaicos residenciales de 1, 3 y 5 kWp en cantones costeros de Manabí. El estudio concluyó que los sistemas de 3 kWp ofrecen el mejor equilibrio entre inversión y retorno para viviendas con consumos cercanos a 150 kWh/mes, con una generación media de 4.562 kWh/año y un periodo de recuperación aproximado de 5,3 años. Este antecedente resulta especialmente valioso porque no se queda en la escala macro del potencial nacional, sino que acerca una lógica de dimensionamiento residencial mucho más

próxima a la que interesa en esta investigación.

A esto se suma que, en Ecuador, el marco regulatorio para el autoabastecimiento con energías renovables ha mostrado avances recientes. La Regulación ARCONEL-005/24 define al sistema de generación distribuida para autoabastecimiento como un conjunto de equipos que aprovechan recursos energéticos renovables no convencionales para consumidores finales y establece un alcance que incluye caracterización, dimensionamiento, conexión, medición y facturación para consumidores regulados (ARCONEL, 2024). Desde la perspectiva del estado del arte, este avance no reemplaza la necesidad de investigación técnica, pero sí muestra que el contexto institucional es hoy más favorable para pensar propuestas de vivienda con integración fotovoltaica.

Finalmente, una línea de investigación más reciente ha empezado a integrar fotovoltaica y vegetación en un mismo sistema de cubierta. Wang et al. (2023) revisaron cubiertas y fachadas verdes con sistemas fotovoltaicos integrados y concluyeron que esta combinación puede generar beneficios mutuos, siempre que se resuelvan adecuadamente aspectos de sombreado, irrigación, desempeño energético, materiales e instalación. Aunque este tipo de estudios todavía es escaso en la región, resulta especialmente sugerente para investigaciones como la presente, porque plantea la posibilidad de leer el techo verde y la energía solar no como estrategias rivales por el uso del espacio, sino como componentes complementarios del diseño sostenible.

2.1.4. Investigaciones sobre índice verde urbano e infraestructura verde

El cuarto eje de antecedentes se relaciona con el índice verde urbano y con las metodologías empleadas para calcularlo mediante geotecnologías. En Ecuador, el INEC definió el índice verde urbano como la cantidad de metros cuadrados de áreas verdes por habitante en las ciudades y reportó para el país un valor promedio de 4,69 m^2 por persona, inferior al umbral internacional de 9 m^2/hab que el propio boletín toma como referencia. Más allá del debate técnico sobre cuál debería ser el estándar más adecuado, ese documento es

importante porque instala el IVU como un indicador de gestión y permite identificar con rapidez situaciones de déficit verde en el territorio nacional (INEC, 2012b).

En cuanto a casos urbanos concretos, el trabajo de Pulla & Rodríguez (2021) sobre la ciudad de Machala constituye uno de los antecedentes más directos para esta tesis. Los autores utilizaron Google Earth Pro, ArcGIS, proyecciones poblacionales del INEC y capas de uso de suelo del geoportal ambiental para calcular el índice verde urbano entre 2000 y 2018. El resultado fue de 2,73 m^2/hab, un valor claramente inferior a la referencia utilizada en el estudio. Además, identificaron un crecimiento urbano horizontal que duplicó la cobertura antrópica en el periodo analizado. Este antecedente es central por dos motivos: primero, porque demuestra que el IVU puede calcularse con herramientas geoespaciales y bases públicas disponibles; segundo, porque evidencia que la expansión urbana no necesariamente se acompaña de una oferta suficiente de áreas verdes.

Un antecedente más reciente de la misma ciudad confirma esa tendencia. Enríquez et al. (2024) evaluaron los cambios en la superficie de área verde urbana de Machala entre 1991 y 2023 e incorporaron variables como distribución espacial, densidad poblacional, accesibilidad y ganancias y pérdidas de áreas verdes. Aunque encontraron un aumento de la superficie verde total, el IVU seguía siendo insuficiente, con apenas 2,60 m^2 por habitante en 2023, además de una distribución desigual entre parroquias. Esto es importante porque muestra que incrementar superficie verde no basta por sí solo; también importa cómo se distribuye, a quién beneficia y qué tan accesible resulta. Para una investigación que utilizará QGIS y plantea un caso de estudio para Milagro, este enfoque resulta especialmente pertinente.

A escala nacional, Hernández et al. (2025) analizaron el índice de espacios verdes urbanos en ciudades ecuatorianas mediante modelación matemática y subrayaron que este indicador permite evaluar cantidad, accesibilidad, calidad y distribución de las áreas verdes. El estudio encontró una relación inversa entre tamaño poblacional y disponibilidad per cápita

de espacio verde, además de señalar la necesidad de mejores sistemas de información y de una mayor coordinación institucional. Este trabajo aporta una lectura más amplia y actual del problema: el IVU no funciona solo como una cifra descriptiva, sino también como una herramienta de planificación capaz de orientar decisiones sobre sostenibilidad urbana, equidad ambiental y priorización territorial.

2.1.5. Vacío de conocimiento y justificación del estudio

La revisión realizada permite sostener que existe un cuerpo de antecedentes suficiente para respaldar cada una de las dimensiones del problema. Por un lado, los estudios de ACV muestran ventajas ambientales potenciales de materiales como el BTC, la tierra apisonada y ciertos materiales reciclados frente al ladrillo cocido convencional. Por otro, la literatura sobre cubiertas verdes evidencia su capacidad para reducir temperatura, mejorar confort y aportar a la mitigación de las islas de calor. De manera paralela, las investigaciones sobre energía solar residencial confirman que existe potencial técnico y que, bajo determinadas condiciones, también puede haber viabilidad económica para integrar sistemas fotovoltaicos en viviendas. Finalmente, los estudios sobre IVU demuestran que el uso de SIG permite cuantificar déficits de infraestructura verde y traducirlos en criterios de planificación urbana.

Sin embargo, al observar estos antecedentes de manera conjunta, se vuelve claro el vacío que justifica la presente investigación. En general, la literatura revisada trabaja de forma fragmentada. Los estudios sobre materiales pocas veces dialogan con el desempeño energético del edificio; las investigaciones sobre cubiertas verdes suelen centrarse en el confort o en la escorrentía, pero no en su articulación con una propuesta material y energética completa; la energía solar residencial suele analizarse desde su potencial técnico o económico, sin incorporarse a una lectura más amplia de sostenibilidad urbana; y los trabajos sobre índice verde urbano rara vez bajan al nivel de una vivienda prototipo para explorar cómo una solución arquitectónica específica podría aportar, aunque sea de forma acotada, a la

infraestructura verde local. De esta revisión se desprende que son escasos los estudios que integran ACV de materiales, eficiencia térmica de cubiertas verdes, dimensionamiento de energía solar y relación con el IVU dentro de una sola propuesta de vivienda, y que son todavía menos frecuentes los que lo hacen en contextos intermedios del litoral ecuatoriano, como el cantón Milagro.

En ese sentido, la contribución esperada no consiste en volver a medir experimentalmente lo que ya ha sido estudiado por separado, sino en articular críticamente esos antecedentes para construir una evaluación integrada de una vivienda sostenible pensada para el contexto local. Desde mi perspectiva, allí se encuentra el principal aporte del estudio: pasar de una evidencia dispersa a una propuesta comparativa y territorialmente situada, capaz de relacionar materialidad, cubierta, energía e infraestructura verde dentro de un mismo marco de análisis.

2.2. Marco Conceptual

2.2.1. Alcance conceptual del estudio

Este marco conceptual busca precisar los términos centrales que sostienen la investigación y vincularlos de manera directa con sus variables. En este estudio no interesa acumular definiciones aisladas, sino construir una base conceptual coherente que permita analizar cómo determinadas estrategias constructivas sostenibles pueden incidir en el desempeño ambiental de una vivienda prototipo en el cantón Milagro. Esta precisión resulta necesaria porque, en el campo de la construcción, conceptos como sostenibilidad, eficiencia y bajo impacto ambiental suelen usarse de forma amplia, aunque no siempre con el mismo alcance técnico. Por ello, este apartado adopta una lectura que relaciona diseño arquitectónico, selección de materiales, energía e infraestructura verde con la evaluación ambiental del proyecto habitacional.

2.2.2. Estrategias constructivas sostenibles

Dentro de la variable independiente, las estrategias constructivas sostenibles se entienden como el conjunto de decisiones de diseño, materialidad y tecnología orientadas a reducir el impacto ambiental de la vivienda a lo largo de su ciclo de vida. Desde esta perspectiva, la arquitectura sostenible no puede quedarse en una imagen “ecológica” del edificio, sino que exige proyectar con criterios de menor consumo energético, uso racional de materiales, adaptación climática y reducción de emisiones asociadas a la construcción y a la operación. En el caso de la vivienda, esto implica dejar atrás una visión centrada exclusivamente en el costo inicial y ampliar la mirada hacia el comportamiento térmico, la demanda energética, la durabilidad y la huella ambiental de los componentes empleados. Por tanto, en esta investigación se asume que una vivienda sostenible no es solo aquella que funciona eficientemente en su uso, sino aquella que es ambientalmente responsable desde su concepción material y espacial (IEA, 2026; Taylor et al., 2023).

Dentro de esta lógica, los materiales constructivos ocupan un lugar central. Su relevancia no depende solo de sus propiedades mecánicas o económicas, sino también de la energía y las emisiones que concentran desde la extracción de materias primas hasta su transformación, transporte, colocación, mantenimiento y disposición final. Por eso, la selección de materiales se vuelve una decisión estratégica para la sostenibilidad de la vivienda. Dicho de otro modo, no basta con analizar cuánto consume una casa una vez habitada; también es necesario comprender cuánto impacto ambiental incorpora desde su propia construcción. En este estudio se asume, entonces, que los materiales no son elementos neutros del proyecto arquitectónico, sino portadores de cargas ambientales diferenciadas, lo que hace pertinente compararlos desde un enfoque de ciclo de vida y carbono incorporado (Lützkendorf & Balouktsi, 2022; Taylor et al., 2023).

Bajo este criterio, el bloque de tierra comprimida estabilizado con cal se incorpora como un concepto clave del estudio. El BTC es un mampuesto elaborado mediante la

compactación mecánica de una mezcla de suelo, normalmente acompañada de aditivos estabilizantes que mejoran su desempeño físico y mecánico. Su interés dentro de la construcción sostenible proviene de que, en comparación con materiales cocidos, puede reducir la energía requerida en el proceso productivo al evitar la etapa de quema. Sin embargo, la literatura también advierte que su sostenibilidad no debe idealizarse. La estabilización con cal o cemento mejora ciertas prestaciones, pero también puede incrementar los impactos ambientales del bloque, por lo que su evaluación exige un equilibrio entre resistencia, durabilidad e impacto ecológico. Por ello, en esta investigación el BTC estabilizado con cal no se asume como una solución automáticamente “verde”, sino como un material alternativo cuyo mérito ambiental debe examinarse críticamente frente al ladrillo cocido y frente a otros componentes de la vivienda (S. P. Cabrera et al., 2020)

Otro componente de la variable independiente es la cubierta verde. En términos conceptuales, se trata de un sistema de techumbre vegetada compuesto por varias capas, entre ellas impermeabilización, drenaje, sustrato y vegetación. Su valor no está solo en el aporte paisajístico, sino en su capacidad para funcionar como estrategia pasiva de regulación térmica y como solución basada en la naturaleza para entornos urbanos densos y cálidos. La literatura reciente muestra que las cubiertas verdes contribuyen a disminuir la temperatura superficial, amortiguar las oscilaciones térmicas, mejorar el confort interior y reducir la demanda energética asociada al enfriamiento. También aportan beneficios hidrológicos, ecológicos y microclimáticos, especialmente en zonas afectadas por sobrecalentamiento urbano. En este estudio, la cubierta verde se entiende, por tanto, como una estrategia constructiva y ambiental al mismo tiempo, porque incide tanto en el edificio como en su entorno inmediato (De Cristo et al., 2025; US EPA, 2026)

La energía solar fotovoltaica completa este conjunto de estrategias. Conceptualmente, se refiere al aprovechamiento de la radiación solar para producir electricidad mediante módulos fotovoltaicos. Su importancia dentro de la vivienda sostenible radica en que permite generar parte de la energía en el mismo lugar donde será consumida,

favoreciendo la descentralización del suministro y reduciendo la dependencia de fuentes convencionales. La expansión de los sistemas distribuidos en cubiertas residenciales confirma que esta tecnología ha dejado de ser una alternativa marginal para convertirse en una opción cada vez más integrada al entorno construido. Además, la literatura muestra que, cuando la tecnología fotovoltaica se incorpora a la envolvente o a la cubierta, no solo cumple una función energética, sino también arquitectónica. En esta tesina, por ello, la energía solar fotovoltaica se entiende como una estrategia activa que apoya el desempeño ambiental de la vivienda y complementa las estrategias pasivas de envolvente y vegetación (IEA, 2024; Lata et al., 2025)

2.2.3. Desempeño ambiental de la vivienda prototipo

La variable dependiente del estudio es el desempeño ambiental de la vivienda prototipo. Aquí este concepto se entiende como la capacidad de una propuesta habitacional para reducir o contener sus impactos ambientales a partir de decisiones de diseño, materiales y energía. En este contexto, la vivienda prototipo no se asume necesariamente como una edificación construida, sino como un modelo de referencia que permite integrar soluciones y evaluar el comportamiento ambiental esperado. Desde esa perspectiva, el desempeño ambiental no se limita a un solo indicador, sino que se expresa en distintas dimensiones medibles, especialmente el análisis de ciclo de vida, la huella de carbono, la energía incorporada, la eficiencia energética y el aporte potencial al Índice Verde Urbano. Esta investigación adopta una visión integradora, pues considera que una vivienda con mejor desempeño ambiental es aquella que logra equilibrar impactos en la fase material, en la fase operativa y en su relación con el espacio urbano (ISO, 2006a; Lützkendorf & Balouktsi, 2022).

El análisis de ciclo de vida constituye el principal marco conceptual para evaluar ese desempeño. De acuerdo con la ISO 14040, el ACV es una metodología que organiza la evaluación ambiental en varias fases: definición del objetivo y alcance, inventario, evaluación de impactos e interpretación. Su valor radica en que evita miradas parciales del problema, ya

que examina los flujos de materiales y energía a lo largo del ciclo de vida del producto o sistema de interés. Aplicado a la construcción, esto implica que la valoración ambiental de un material o de una vivienda no debería limitarse al uso final, sino incluir también la producción y, cuando el alcance lo permite, el mantenimiento y el fin de vida. En esta tesina, el ACV se asume como el marco metodológico y conceptual que permitirá contrastar materiales y estrategias a partir de información secundaria ya disponible en la literatura científica, en coherencia con el alcance del estudio y con el enfoque comparativo planteado (ISO, 2006a, 2018)

Un concepto estrechamente vinculado es la huella de carbono. Mientras el ACV puede abarcar múltiples categorías de impacto, la huella de carbono concentra su atención en el cambio climático y mide las emisiones de gases de efecto invernadero expresadas en dióxido de carbono equivalente. En los edificios, esta noción ha cobrado mayor relevancia porque la mejora en la eficiencia operativa ha hecho más visible el peso relativo del carbono incorporado en los materiales y en los procesos constructivos. Por ello, en esta investigación la huella de carbono se entiende como un indicador sintético y comparativo del impacto climático asociado a los materiales y a la vivienda prototipo. Al mismo tiempo, se reconoce que se trata de un indicador más acotado que el ACV completo, razón por la cual se lo utilizará como una dimensión específica dentro de una evaluación ambiental más amplia (ISO, 2018; Lützkendorf & Balouktsi, 2022)

Otro concepto clave es la energía incorporada, también conocida como energía embebida o energía contenida en los materiales. Se refiere a la energía necesaria para extraer materias primas, fabricar componentes, transportarlos, construir, mantener y, en algunos enfoques, gestionar su fin de vida. Su importancia radica en que permite entender que el impacto energético de una vivienda no depende solo del consumo de electricidad o climatización durante el uso, sino también de la energía ya acumulada en los materiales y sistemas que la conforman. Esta idea resulta especialmente relevante en viviendas con mejor desempeño térmico, porque a medida que disminuye la energía operativa, adquiere más peso

relativo la energía incorporada en la construcción. En consecuencia, esta tesina adopta el concepto de energía incorporada como una medida fundamental para comparar alternativas materiales y evitar que una mejora operativa aparente oculte una carga inicial elevada (Crawford & Hall, 2020; Minunno et al., 2021)

La eficiencia energética, por su parte, se entiende aquí como la capacidad de una vivienda para ofrecer condiciones de habitabilidad y confort con una menor demanda de energía. En términos conceptuales, no depende solo del rendimiento de los equipos, sino también de la relación entre clima, envolvente, orientación, sombreado, ventilación, soluciones vegetadas y aprovechamiento de energías renovables. Dicho de otro modo, una vivienda eficiente no es simplemente aquella que incorpora paneles solares, sino aquella que primero reduce sus necesidades energéticas mediante estrategias pasivas y luego complementa ese desempeño con soluciones activas. Esta distinción es importante para la presente investigación, porque la cubierta verde y el sistema fotovoltaico no cumplen la misma función: la primera actúa principalmente sobre la moderación térmica y el confort, mientras que el segundo aporta generación eléctrica. Ambos forman parte de una misma lógica de eficiencia, pero inciden en etapas distintas del balance energético de la vivienda (De Cristo et al., 2025; IEA, 2026)

2.2.4. Indicadores ambientales de evaluación

Finalmente, el Índice Verde Urbano es un concepto necesario para conectar la escala de la vivienda con la escala de la ciudad. En Ecuador, el INEC lo ha definido como la cantidad de áreas verdes urbanas dividida para el número de habitantes urbanos. Esa formulación lo presenta como un indicador de dotación de verde por habitante, útil para examinar la disponibilidad general de espacios vegetados en un territorio. Sin embargo, investigaciones más recientes han ampliado esta lectura y sostienen que el índice también debe interpretarse en función de la calidad, la accesibilidad y la distribución espacial de esas áreas verdes. Para esta tesina, el IVU no se entenderá como un valor estático, sino como un indicador urbano al

que una estrategia arquitectónica puntual, como la incorporación de una cubierta verde, puede aportar de manera potencial. Por eso, el estudio trabajará con la idea de “aporte potencial al IVU”, evitando sobredimensionar el efecto de una sola vivienda sobre el indicador cantonal, pero reconociendo su utilidad para plantear escenarios de sostenibilidad urbana apoyados en SIG y QGIS (Enríquez et al., 2024; Hernández et al., 2025; INEC, 2012a).

2.2.5. Síntesis conceptual del estudio

A partir de lo anterior, esta investigación adopta una posición conceptual clara: la sostenibilidad de la vivienda no puede evaluarse de manera fragmentada. No basta con elegir un material alternativo, incorporar paneles solares o proponer una cubierta vegetal por separado. Lo que da sentido al estudio es la integración de esas decisiones en una misma unidad arquitectónica y su lectura conjunta mediante indicadores ambientales. En ese marco, las estrategias constructivas sostenibles representan el conjunto de acciones materiales, bioclimáticas y tecnológicas que configuran la variable independiente, mientras que el desempeño ambiental de la vivienda prototipo expresa el resultado esperado de esa integración. Este posicionamiento permite sostener que la vivienda sostenible, especialmente en contextos cálidos y urbanos como Milagro, debe analizarse desde una lógica de ciclo de vida, eficiencia energética y articulación con la infraestructura verde urbana. Esa es la base conceptual que orienta el desarrollo del resto de la investigación (INEC, 2012a; ISO, 2006a)

2.3. Marco Teórico

2.3.1. Desarrollo urbano sostenible y ciudades ecológicas

El desarrollo urbano sostenible constituye el marco más amplio desde el cual se entiende esta investigación. En América Latina y el Caribe, la urbanización no puede leerse solo como crecimiento físico de las ciudades, sino como un proceso que concentra oportunidades, desigualdades, presiones ambientales y desafíos de gobernanza. En ese sentido, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe ha señalado que la urbanización es un factor clave del desarrollo sostenible, pero también una fuente de retos

económicos, sociales, ambientales y espaciales que obligan a repensar la planificación urbana de forma integral. Más recientemente, la propia CEPAL ha insistido en que el desarrollo urbano sostenible requiere una aproximación multisectorial y multinivel, en la que la vivienda no sea vista como un objeto aislado, sino como parte de un sistema territorial más amplio. Esta perspectiva resulta especialmente pertinente para el presente estudio, porque permite vincular la escala arquitectónica de la vivienda con la escala urbana del cantón Milagro (CEPAL, 2023; CEPAL et al., 2016)

En esta misma línea, ONU-Hábitat sostiene que la planificación urbana, si quiere ser coherente con la sostenibilidad, debe orientar a las ciudades hacia una economía verde menos dependiente de los combustibles fósiles. Al mismo tiempo, el organismo advierte que el cambio climático está intensificando los riesgos urbanos, de modo que las ciudades necesitan fortalecer su capacidad de adaptación y resiliencia. Esto implica que ya no basta con ampliar infraestructura o construir más vivienda; también es necesario reducir vulnerabilidades, mejorar el desempeño ambiental del entorno construido e incorporar soluciones que combinen habitabilidad, eficiencia y regeneración ecológica. En otras palabras, la sostenibilidad urbana exige pasar de una lógica expansiva y altamente consumidora de recursos a una lógica de diseño territorial más eficiente y sensible al clima (ONU-HABITAT, s. f.).

En este marco, la idea de ciudad ecológica o ciudad sostenible no debe leerse como una imagen idealizada, sino como un horizonte de transformación concreta. La literatura reciente muestra que la sostenibilidad urbana articula preocupaciones ecológicas, económicas y sociales dentro de un mismo cuerpo teórico, y que su aplicación depende en gran medida de cómo se diseñan las infraestructuras, las edificaciones y los espacios públicos (Contreras Escandón, 2017). Por ello, este trabajo asume que la vivienda sostenible no es un tema exclusivamente arquitectónico, sino una pieza del urbanismo sostenible. Esta posición resulta importante porque justifica que una propuesta de vivienda prototipo pueda evaluarse no solo por sus características constructivas, sino también por su posible contribución al desarrollo urbano del territorio donde se inserta.

Un componente decisivo de esta discusión es la infraestructura verde. Diversos autores la definen como una red interconectada de áreas verdes urbanas, periurbanas y rurales que conserva funciones ecosistémicas y aporta servicios ambientales a la población. No se trata solo de parques o jardines ornamentales, sino de una estructura ecológica capaz de regular la temperatura, mejorar la infiltración, atenuar escorrentías, aportar conectividad y reforzar la resiliencia del paisaje urbano. En estudios mexicanos recientes se destaca que la infraestructura verde urbana cumple un papel relevante frente al cambio climático y al efecto de isla de calor, precisamente porque funciona como una interfaz entre ciudad, ecosistemas y bienestar humano (Ochoa & Ojeda, 2017).

La relación entre vegetación urbana, confort y salud ambiental también ha sido confirmada empíricamente. En el Área Metropolitana de Guadalajara, Camacho Sandoval et al. (2024) encontraron que la infraestructura verde actúa como reguladora del clima urbano, que la pérdida de verdor deteriora servicios ecosistémicos de regulación climática y que las zonas con vegetación presentan temperaturas del suelo menores que aquellas dominadas por superficies urbanizadas. Hallazgos como estos refuerzan una idea central para esta tesis: el desarrollo urbano sostenible no puede separarse de la incorporación de naturaleza en la ciudad. Por ello, en esta investigación la cubierta verde no se considera un elemento decorativo, sino una estrategia de infraestructura verde a escala doméstica con potencial de incidencia urbana cuando se analiza de manera agregada.

2.3.2. Arquitectura sostenible y vivienda prototipo

Si el desarrollo urbano sostenible constituye el marco general, la arquitectura sostenible representa el nivel disciplinar desde el cual esa aspiración se concreta en la edificación. En el contexto ecuatoriano, Alvear Calle et al. (2016) sintetizan este enfoque a partir de tres principios: economía de los recursos, ciclo de vida de la edificación y diseño humano. Esta formulación resulta especialmente útil porque desplaza la discusión desde una mirada puramente tecnológica hacia una comprensión más integral del edificio, donde importan al mismo tiempo los materiales, el consumo de energía, la relación con el entorno y

la calidad del espacio habitable. Desde esta lógica, una vivienda sostenible no es solo la que “ahorra” recursos, sino la que ha sido concebida para responder de forma equilibrada al ambiente y a las necesidades de sus ocupantes.

En esa misma línea, la arquitectura bioclimática aporta un sustento teórico fundamental para esta investigación. (Rodríguez et al., 2021) señalan que la arquitectura bioclimática surge de la necesidad de adaptar las edificaciones al entorno para aprovechar los recursos disponibles y alcanzar condiciones de confort con el menor uso posible de energía convencional. Esta idea es clave para el caso de Milagro, donde las condiciones cálido-húmedas obligan a pensar en ventilación, protección solar, masa térmica y comportamiento de la envolvente antes de recurrir a soluciones activas de climatización, además, en el análisis higrotérmico de una vivienda, que la falta de ventilación cruzada y la exposición directa de la cubierta pueden agravar el disconfort, lo que confirma la relevancia de las estrategias pasivas en el desempeño ambiental de la vivienda.

En esa misma línea, la arquitectura bioclimática aporta un sustento teórico fundamental para esta investigación. Rodríguez et al. (2021) señalan que la arquitectura bioclimática surge de la necesidad de adaptar las edificaciones al entorno para aprovechar los recursos disponibles y alcanzar condiciones de confort con el menor uso posible de energía convencional. Esta idea es especialmente importante para el caso de Milagro, donde las condiciones cálido-húmedas obligan a pensar primero en ventilación, protección solar, masa térmica y comportamiento de la envolvente antes de recurrir a soluciones activas de climatización. A ello se suma que, en el análisis higrotérmico de una vivienda, la falta de ventilación cruzada y la exposición directa de la cubierta pueden agravar el disconfort, lo que confirma la relevancia de las estrategias pasivas en el desempeño ambiental de la vivienda.

Además, la evidencia empírica disponible muestra que estas estrategias no solo son deseables desde el punto de vista conceptual, sino también efectivas en términos energéticos. En una vivienda de interés social en Guanajuato, la combinación de mayor espesor en muros y techo, superficies claras y ajustes en aperturas permitió proyectar una reducción del 77 % de la energía necesaria para el acondicionamiento térmico anual. Aunque

se trata de un clima y un contexto distintos, el principio teórico es transferible: el diseño arquitectónico puede disminuir de manera significativa la dependencia energética del edificio. Por ello, en esta tesis la vivienda prototipo se entiende como un modelo de articulación entre diseño bioclimático, selección material y tecnologías complementarias, más que como un ejercicio exclusivamente formal (Rodríguez et al., 2021).

A este enfoque se suma la economía circular aplicada a la construcción. Frente al modelo lineal de extraer, fabricar, usar y desechar, la literatura reciente insiste en estrategias de deconstrucción, reutilización y valorización material. El proyecto ReCreate, desarrollado en Europa, muestra que los elementos prefabricados de hormigón pueden deconstruirse y reutilizarse, prolongando su vida útil y reduciendo residuos y huella de carbono. Más allá de ese caso específico, el aporte teórico relevante consiste en recordar que la sostenibilidad constructiva no se limita al momento de uso de la vivienda, sino que empieza con la forma en que se concibe el ciclo de los materiales. Esta visión dialoga de manera directa con la necesidad de introducir materiales reciclados y reducir la intensidad ambiental de los componentes empleados en la vivienda prototipo (Stenberg et al., 2023).

2.3.3. Análisis de ciclo de vida en el sector de la construcción

El Análisis de Ciclo de Vida constituye la herramienta metodológica central para evaluar el desempeño ambiental de materiales y sistemas constructivos. Las normas ISO 14040 e ISO 14044 establecen que el ACV comprende, de forma general, la definición del objetivo y alcance, el análisis de inventario, la evaluación de impactos y la interpretación de resultados. La primera norma describe los principios y el marco general, mientras que la segunda especifica los requisitos y directrices para aplicar la metodología. En términos teóricos, esto significa que el ACV no es solo una técnica de cálculo, sino un marco estandarizado para comparar alternativas bajo criterios de transparencia, consistencia y trazabilidad (ISO, 2006b, 2006a)

Uno de los aspectos más importantes del ACV en construcción es la definición de los límites del sistema. Dependiendo del estudio, el análisis puede plantearse de cuna a puerta,

de cuna a tumba o con otras delimitaciones funcionales. Muñoz et al. (2012), en una investigación sobre vivienda social en Chile, incluyeron las fases de fabricación de materiales, construcción y uso, y encontraron que la mayor huella de carbono de la fase constructiva se asociaba a las fundaciones y a las albañilerías de ladrillo. Esta observación resulta muy relevante para el presente trabajo porque confirma que la elección del material de mampostería no es una decisión menor, sino una variable capaz de modificar de manera sustancial el impacto ambiental total de una vivienda.

En el campo latinoamericano, la literatura también muestra un desplazamiento progresivo desde visiones centradas exclusivamente en la energía operativa hacia análisis que incorporan energía incorporada, huella de carbono, residuos y otros indicadores del proceso constructivo. Rivero Camacho et al. (2021), por ejemplo, encontraron que los materiales de construcción concentraban la mayor parte de la huella ecológica y una proporción muy considerable de la huella de carbono en edificios públicos, lo cual refuerza la idea de que el impacto ambiental del edificio comienza mucho antes de su ocupación. Desde esta perspectiva, evaluar materiales como ladrillo cocido, BTC o componentes reciclados no es un ejercicio accesorio, sino una condición necesaria para hablar de vivienda sostenible con mayor rigor.

Ahora bien, en esta tesina el ACV se abordará a partir de información secundaria. Esto significa que no se desarrollará un inventario primario con software especializado para cada material, sino una síntesis comparativa de resultados obtenidos en investigaciones previas, seleccionadas por su pertinencia metodológica y contextual. Esta decisión no debilita el estudio; por el contrario, permite concentrar el análisis en la comparación crítica de evidencias ya producidas y en su aplicación al caso de una vivienda prototipo en Milagro. Desde mi posición como investigador, el interés no está en replicar mecánicamente estudios existentes, sino en aprovecharlos para fundamentar una propuesta arquitectónica y urbana situada en su contexto. Esa es, precisamente, la utilidad del ACV como enfoque: aportar criterios para la toma de decisiones de diseño.

2.3.4. Materiales constructivos y desempeño ambiental

Dentro del conjunto de materiales constructivos habitualmente empleados en vivienda, el ladrillo cocido sigue siendo una referencia dominante en buena parte del Ecuador. Sin embargo, la evidencia disponible muestra que su proceso de fabricación arrastra una carga ambiental significativa. En Cuenca, una investigación sobre ladrillo semimecanizado tochano concluyó que sus impactos al aire están asociados al consumo de recursos no renovables y a la generación de contaminantes durante la producción. De manera similar, una tesis desarrollada en la UTPL comparó ladrillos cocidos y ladrillos suelo-cemento en el sur del Ecuador y evidenció que los ladrillos cocidos generan mayores impactos en categorías como cambio climático, uso del suelo y agotamiento de recursos hídricos. En consecuencia, el ladrillo tradicional no puede seguir considerándose un material ambientalmente neutro (Camacho Ochoa, 2021; Venegas Tomalá, 2018).

Frente a ello, el bloque de tierra comprimida aparece como una alternativa de especial interés para esta investigación. (Carvalho et al., 2023), al evaluar sistemas de mampostería de bloques de suelo-cemento con distintas dosificaciones, encontraron que la cal presenta un menor costo ambiental que el cemento Portland y que la incorporación de residuo cerámico aporta beneficios ambientales adicionales. Este hallazgo resulta especialmente valioso para el marco teórico del estudio, porque no solo respalda el uso del BTC, sino que también permite afinar la propuesta hacia un BTC estabilizado con cal, en coherencia con el objetivo de reducir impactos desde la selección misma del material.

La discusión no se agota en la comparación entre ladrillo cocido y BTC. La literatura más reciente en Ecuador muestra que la incorporación de materiales reciclados y de estrategias circulares en vivienda social puede disminuir significativamente los impactos ambientales, sobre todo en categorías relacionadas con cambio climático y agotamiento de recursos. En el estudio de Vélez-Torres et al. (2025), las etapas de extracción y producción fueron las más impactantes, y se concluyó que el uso de materiales reciclados y la reutilización de acero reducen la huella del proceso constructivo. Desde una perspectiva

teórica, esto confirma que el desempeño ambiental no depende únicamente del tipo de material principal, sino de la lógica completa de abastecimiento, transformación y reaprovechamiento. Por ello, en esta tesina los materiales reciclados se incorporan como parte de un enfoque constructivo de menor intensidad ambiental, y no solo como una solución complementaria.

2.3.5. Cubiertas verdes y sistemas fotovoltaicos

Las cubiertas verdes se incorporan en esta investigación como una estrategia híbrida que pertenece al mismo tiempo al campo de la arquitectura sostenible y al de la infraestructura verde urbana. Su valor teórico radica en que transforman una superficie pasiva, expuesta a radiación y escorrentía, en otra con capacidad de regulación térmica, retención hídrica y aporte ecológico. La EPA ha documentado que las cubiertas verdes pueden reducir de manera importante la temperatura superficial frente a cubiertas convencionales, disminuir la carga de enfriamiento y contribuir a la reducción de las islas de calor. Aunque estos datos provienen del contexto estadounidense, su utilidad aquí es conceptual: muestran que la cubierta verde no es un gesto ornamental, sino una tecnología ambiental con desempeño comprobado (US EPA, 2026).

En el ámbito latinoamericano, la evidencia experimental también resulta clara. Cuevas Acuña et al. (2024), al evaluar un prototipo de techo verde bajo condiciones de calor extremo, comprobaron una disminución promedio de 4,03 °C en la temperatura interior de bulbo seco respecto al módulo base, además de un aumento importante del tiempo en confort térmico y una reducción de las oscilaciones térmicas. Para una investigación como la presente, desarrollada en un contexto cálido, estos resultados son especialmente significativos porque muestran que la cubierta verde puede actuar como una estrategia pasiva de control térmico con incidencia directa sobre la habitabilidad y la demanda energética de la vivienda.

Por su parte, los sistemas fotovoltaicos residenciales se justifican desde la lógica de la generación distribuida y del autoconsumo. Ollivier-Fierro et al. (2024) definen la generación distribuida como la producción de electricidad cerca de los centros de consumo,

generalmente en residencias o empresas, con el objetivo principal del autoconsumo. Este cambio de paradigma resulta relevante porque desplaza la vivienda de un rol de consumidora pasiva hacia el de una unidad capaz de producir parte de su propia energía. En el caso de la vivienda prototipo, esta idea es fundamental para sustentar el dimensionamiento fotovoltaico como una estrategia orientada a reducir la dependencia de la red convencional y a mejorar el desempeño ambiental general.

La integración arquitectónica del sistema fotovoltaico también merece una atención específica. En viviendas, el rendimiento real depende de la geometría de la cubierta, la orientación, la inclinación y la superficie útil disponible. Zalamea León et al. (2019) mostraron que, en 32 tipologías de techos inclinados, alrededor del 36 % de la superficie no era útil para paneles solares convencionales, mientras que las tejas fotovoltaicas reducían esa pérdida al 12 %.

2.3.6. Índice Verde Urbano y análisis espacial con SIG

El Índice Verde Urbano es el concepto que permite conectar la propuesta arquitectónica con una lectura territorial más amplia. En términos generales, este indicador expresa la relación entre superficie de áreas verdes y número de habitantes, normalmente en metros cuadrados por habitante. La literatura reciente reconoce que se trata de uno de los indicadores más utilizados para estimar la dotación de áreas verdes en las ciudades, aunque también advierte que su interpretación debe ser crítica, porque la simple cantidad no siempre refleja accesibilidad, calidad o distribución espacial. Casillas Zapata (2023), por ejemplo, recuerda que el parámetro de 9 m^2 por habitante suele difundirse como recomendación de la OMS, pero subraya que su trazabilidad documental ha sido discutida. Esta observación es valiosa porque evita usar el IVU de manera acrítica y obliga a leerlo dentro de sus alcances y limitaciones.

En Ecuador, el INEC ha utilizado precisamente ese valor de 9 m^2 por habitante como referencia nacional. En la presentación del Índice Verde Urbano 2012 se reporta un promedio nacional de 13,01 m^2/hab, pero también se evidencia una marcada desigualdad territorial, ya

que la provincia de El Oro registra apenas 3,73 m^2/hab. Este dato resulta especialmente importante para la presente investigación porque sitúa al entorno provincial de Milagro en una región donde el déficit de verde urbano no es un asunto menor. Dicho de otra manera, la propuesta de cubierta verde adquiere relevancia no solo por sus beneficios térmicos o energéticos, sino también por su posible aporte, aunque sea parcial y potencial, a una discusión más amplia sobre la suficiencia de áreas verdes urbanas (INEC, 2012a).

Los estudios de Machala confirman esta problemática en el contexto costero ecuatoriano. Pulla & Rodríguez (2021) señalan que las áreas verdes son componentes importantes para la organización y el funcionamiento de la ciudad, mientras que Enríquez et al. (2024) muestran que, pese al incremento de superficie verde en el tiempo, la ciudad todavía presenta un IVU bajo y una distribución espacial desigual. Estos antecedentes resultan pertinentes porque Machala comparte con otras ciudades costeras procesos de urbanización acelerada y déficit de verde urbano, lo que fortalece la necesidad de estudiar cómo una estrategia edificatoria puede incorporarse a la lógica de infraestructura verde del territorio.

Para analizar este indicador, los Sistemas de Información Geográfica ofrecen una base metodológica sólida. La documentación oficial de QGIS explica que un SIG permite abrir mapas digitales, crear nueva información espacial, producir cartografía temática y realizar análisis espaciales. En otras palabras, no se trata solo de un visor cartográfico, sino de una herramienta de modelación territorial. En estudios urbanos, esta capacidad se ha utilizado para inventariar áreas verdes, calcular densidades por habitante y evaluar distribución espacial mediante imágenes satelitales, datos censales y cartografía temática. El caso de la Ciudad de México resulta ilustrativo: su inventario de áreas verdes se actualizó mediante SIG e imágenes satelitales de alta resolución, generando información útil para la gestión y la planificación (Núñez, 2021; QGIS, 2026)

Por ello, en esta investigación el uso de QGIS no se plantea como una herramienta secundaria, sino como el medio para territorializar la propuesta. A través del análisis espacial será posible estimar el IVU del caso de estudio y valorar, de manera prospectiva, el aporte

potencial de la cubierta verde en relación con la superficie disponible y la población. Este enfoque es coherente con metodologías recientes sobre áreas verdes urbanas, las cuales sostienen que la evaluación puede apoyarse en fuentes secundarias y primarias y que debe considerar no solo dimensiones técnicas, sino también los beneficios colectivos asociados al enverdecimiento urbano, incluidos los tejados verdes (Briz de Felipe & de Felipe Boente, 2017).

2.3.7. Posicionamiento teórico

A partir de lo revisado, asumo que la sostenibilidad urbana no puede alcanzarse mediante intervenciones fragmentadas. No basta con incorporar energía solar si se mantienen materiales de alta intensidad ambiental. Tampoco es suficiente hablar de áreas verdes urbanas si la vivienda sigue reproduciendo lógicas térmicas ineficientes y sistemas constructivos poco sostenibles. Mi posición teórica parte de entender la vivienda como una unidad ambiental y urbana al mismo tiempo; es decir, como un espacio habitable que debe responder al clima, reducir su carga material, producir parte de su energía y, además, integrarse a una lógica más amplia de infraestructura verde. Esta postura se apoya en una visión sistémica del desarrollo urbano sostenible y en una arquitectura que no separa edificio, territorio y ambiente (Alvear Calle et al., 2016; CEPAL, 2023)

En coherencia con ello, este estudio adopta un enfoque aplicado. El ACV se empleará como herramienta de evaluación comparativa a partir de fuentes secundarias, mientras que el análisis espacial con SIG permitirá situar la propuesta en el caso concreto del cantón Milagro. De esta manera, la investigación no pretende ofrecer una solución universal, sino construir una base técnica y conceptual que permita mostrar cómo la integración de BTC estabilizado con cal, materiales reciclados, cubierta verde y sistema fotovoltaico puede mejorar el desempeño ambiental de una vivienda prototipo y, de forma potencial, aportar al desarrollo urbano sostenible del territorio. Esa es la contribución que este marco teórico busca sostener.

CAPÍTULO III: Diseño Metodológico

3.1. Tipo y diseño de investigación

Este estudio se abordó desde un enfoque cuantitativo, porque la comparación del caso se apoya en variables medibles y expresadas numéricamente. Para la vivienda prototipo se trabajó con huella de carbono, energía incorporada, consumo estimado, potencia fotovoltaica instalada, superficie de cubierta verde e IVU.

Por su alcance, la investigación es explicativa. No se limita a describir materiales o tecnologías, sino que busca entender cómo ciertas estrategias constructivas sostenibles inciden en el desempeño ambiental de una vivienda unifamiliar. Esa lógica es coherente con la hipótesis planteada en el estudio.

El diseño es no experimental y transversal. No se manipularon variables en condiciones controladas; se trabajó con información secundaria, cálculos técnicos y análisis espacial aplicados al caso de estudio. Además, la información se levantó y analizó en un solo momento del proceso investigativo. En el componente ambiental, el estudio toma como referencia el marco metodológico del análisis de ciclo de vida definido por las normas ISO 14040 e ISO 14044, que estructuran este tipo de evaluación a partir de la definición de objetivo y alcance, análisis de inventario, evaluación de impactos e interpretación de resultados (ISO, 2020).

En la parte metodológica se recurrió al análisis-síntesis, al razonamiento inductivo-deductivo y al método comparativo. Estos procedimientos permitieron descomponer la información técnica, contrastar alternativas y volver a integrarla en una lectura general de la vivienda prototipo.

3.2. La población y la muestra

Como el estudio no trabaja con personas, la población y la muestra se definieron a partir de los objetos analizados. La población incluye materiales y estrategias sostenibles aplicables a viviendas unifamiliares de la Costa ecuatoriana, especialmente aquellas que

pueden incorporarse al prototipo estudiado.

La muestra es de tipo no probabilística e intencional. Se eligieron, por pertinencia técnica, ambiental y contextual, cinco alternativas de muro: ladrillo tochano, bloque de hormigón con áridos naturales, bloque de hormigón con áridos reciclados, bloque de tierra comprimida estabilizado con cal y bloque de tierra comprimida estabilizado con cemento ordinario. A ello se suman dos estrategias sostenibles complementarias: la incorporación de una cubierta verde y el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico para la vivienda prototipo.

El caso de estudio corresponde a una vivienda prototipo unifamiliar cuya superficie total de muros es de 165 m^2. Sobre esa base se calculó la cantidad requerida de piezas por alternativa: 1.541 unidades para ladrillo y bloques de hormigón, y 2.909 unidades para los BTC. En consecuencia, la unidad funcional del estudio se asume como la cantidad total de bloques necesarios para conformar los muros de la vivienda prototipo, lo que permite mantener una base homogénea para la comparación ambiental entre materiales.

3.3. Los métodos y las técnicas

La variable independiente corresponde a las estrategias constructivas sostenibles y la dependiente al desempeño ambiental de la vivienda prototipo. Para analizarlas se seleccionaron técnicas e instrumentos coherentes con la naturaleza aplicada del estudio y con la información efectivamente disponible.

En primer lugar, se utilizará la revisión documental para identificar estudios científicos, tesis y documentos técnicos relacionados con análisis de ciclo de vida de materiales constructivos, cubiertas verdes, sistemas fotovoltaicos e infraestructura verde urbana. Esta técnica se apoyará en una matriz bibliográfica que permita organizar autores, objetivos, variables, indicadores y resultados relevantes. De manera complementaria, se elaborarán fichas técnicas para registrar las características de los materiales seleccionados, así como las dimensiones de la vivienda prototipo y los parámetros necesarios para el análisis

energético y espacial.

En el componente de ACV se aplicó una comparación con información secundaria. No se desarrolló un ACV primario completo; se trabajó con resultados publicados y luego se los llevó a una base comparable para el caso del prototipo. Esta decisión metodológica es coherente con el marco de las normas ISO 14040 e ISO 14044, que establecen los principios, requisitos y lineamientos del ACV, pero también permiten interpretar resultados provenientes de estudios previos siempre que se especifique el objetivo, el alcance y los límites del sistema utilizados como referencia (ISO, 2020).

En tercer lugar, se desarrollarán cálculos técnicos para estimar el comportamiento energético de la vivienda. Estos cálculos se emplearán para determinar la demanda energética a cubrir mediante el sistema fotovoltaico y para definir la potencia requerida del arreglo solar a partir de supuestos técnicos y parámetros de consumo residencial. Este procedimiento será sistematizado mediante hojas de cálculo, que servirán también para el ordenamiento y verificación de resultados.

El componente espacial se trabajó con Sistemas de Información Geográfica en QGIS. Esta herramienta se usó para digitalizar áreas verdes y techos, organizar capas y generar cartografía temática. En este estudio, QGIS no fue un apoyo visual aislado, sino parte del procedimiento para estimar el aporte potencial al IVU de Milagro (QGIS, 2026).

Los indicadores evaluados serán: huella de carbono, energía incorporada, consumo energético estimado, potencia fotovoltaica instalada, superficie de cubierta verde y aporte potencial al Índice Verde Urbano. En cuanto a la validez y confiabilidad, estas se sostienen en la selección de fuentes académicas y normativas de reconocido respaldo, entre ellas artículos científicos revisados por pares, tesis universitarias, documentos técnicos, las normas ISO 14040 e ISO 14044, así como información oficial del Instituto Nacional de Estadística y Censos y del Gobierno Autónomo Descentralizado de Milagro. En el caso del IVU, se empleará la definición oficial del INEC, que lo entiende como el patrimonio de áreas verdes o

zonas terrestres de interés naturalístico e histórico-cultural gestionadas por entidades públicas, lo que aporta una base institucional clara para el análisis espacial posterior (INEC, 2012a).

3.4. Procesamiento estadístico de la información

El procesamiento de la información fue descriptivo, en consonancia con el diseño no experimental y con el uso de datos técnicos y secundarios. Primero se organizaron los datos de la revisión documental, del ACV comparativo y de los cálculos energéticos en matrices elaboradas para esta tesina.

Posteriormente, se aplicarán procedimientos de estadística descriptiva, principalmente cálculo de porcentajes, promedios y razones, con el fin de comparar el comportamiento ambiental de los materiales seleccionados y valorar su incidencia relativa en la vivienda prototipo. Los resultados se presentarán mediante tablas y gráficos comparativos, lo que facilitará identificar la alternativa con menor impacto ambiental y relacionarla con la incorporación de tecnologías de sostenibilidad en la vivienda.

En el componente territorial, la información geoespacial será procesada en QGIS, a partir de cartografía base y capas vinculadas con cobertura urbana y áreas verdes. Mediante esta herramienta se elaborará cartografía temática orientada a estimar el aporte potencial de la cubierta verde al Índice Verde Urbano del cantón Milagro. La pertinencia de este procedimiento se justifica tanto por la disponibilidad de herramientas de geoprocesamiento en QGIS como por la naturaleza oficial del IVU como indicador ambiental del INEC.

En síntesis, el procesamiento no buscó inferencias complejas ni causalidades experimentales. Su propósito fue ordenar, comparar e interpretar técnicamente la evidencia reunida para identificar tendencias del caso, dimensionar el sistema fotovoltaico y estimar el aporte de la cubierta verde al IVU generando una base cartográfica y analítica que sustente la propuesta de vivienda sostenible para el cantón Milagro.

CAPÍTULO IV: Análisis e Interpretación de Resultados

4.1. Análisis e Interpretación de Resultados

4.1.1. Comparación ambiental de los materiales constructivos

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para la vivienda prototipo a partir de dos dimensiones de análisis. En primer lugar, se compara el desempeño ambiental de los materiales constructivos seleccionados mediante los indicadores de huella de carbono y energía incorporada. En segundo lugar, se evalúa la demanda energética del prototipo y el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico capaz de cubrirla total o parcialmente. La interpretación de estos resultados permite avanzar en el cumplimiento de los objetivos específicos relacionados con la selección de materiales de menor impacto y con la incorporación de estrategias activas de eficiencia energética.

Con el fin de establecer una base comparativa homogénea, se recopilaron valores unitarios de huella de carbono y energía incorporada correspondientes a los materiales constructivos seleccionados. Estos datos, obtenidos de estudios previos, constituyen el punto de partida para estimar el impacto total asociado a la construcción de los muros de la vivienda prototipo.

La Tabla 2 presenta los impactos unitarios reportados en la literatura para cada material. En esta etapa del análisis interesa, identificar qué alternativa presenta menores cargas ambientales por unidad y, posteriormente, trasladar esos resultados a la escala real de la vivienda mediante la cantidad de bloques requerida.

Tabla 2

Impactos unitarios reportados en la literatura

Material	**kg CO_2-eq/bloque**	**MJ/bloque**	**Fuente**
Ladrillo tochano	1,0422	9,3423	(Venegas Tomalá, 2018)

Bloque de hormigón convencional	0,71	6,14	(Butcher, 2025)
Bloque de hormigón con áridos reciclados	1,18	N.R.	(Pešta et al., 2020)
Bloque de tierra comprimida con CAL (10%)	0,415	2,4419	(S. P. Cabrera et al., 2020)
Bloque de tierra comprimida con CTO (10%)	0,416	2,1316	

Nota. N.R. = No reportado. El valor de 1,18 kg CO_2-eq/bloque del bloque de hormigón con áridos reciclados fue calculado a partir del potencial de calentamiento global y de la masa del sistema constructivo reportado en la fuente.

Los resultados unitarios muestran una diferencia clara entre los materiales evaluados. Los bloques de tierra comprimida estabilizados con cal y con cemento ordinario presentan las menores emisiones de CO_2 por unidad, con valores muy próximos entre sí. En términos de energía incorporada, ambas alternativas también registran los valores más bajos, lo que evidencia una ventaja ambiental frente a materiales convencionales como el ladrillo tochano y el bloque de hormigón.

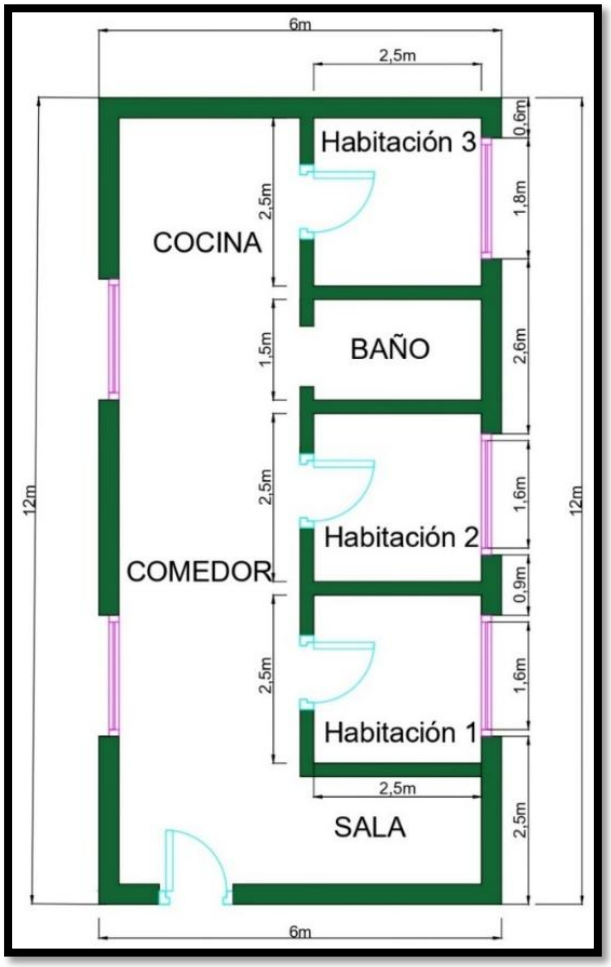
Por el contrario, el ladrillo tochano presenta la mayor energía incorporada por unidad, mientras que el bloque de hormigón con áridos reciclados registra la mayor huella de carbono unitaria entre las alternativas comparadas. En este último caso, la comparación energética queda incompleta, debido a que la fuente consultada no reporta el valor de energía incorporada. Este aspecto debe mantenerse explícito, ya que condiciona el alcance de la comparación posterior, sin embargo, la diferencia de la huella de carbono es muy evidente.

Para trasladar estos impactos unitarios a la escala del caso de estudio, se definió

como unidad funcional la totalidad de los muros de la vivienda prototipo. La Figura 1 muestra la planta arquitectónica utilizada como base para la estimación del número de bloques requeridos en cada alternativa constructiva.

Figura 1

Plano de la vivienda prototipo (como base de ejemplo)



Nota. Fuente: Elaboración propia

La vivienda prototipo presenta una superficie total de muros de 165 m². A partir de este valor y de las dimensiones nominales de cada bloque, se calculó la cantidad de unidades necesarias para conformar los cerramientos verticales, excluyendo la losa, la cimentación y los vanos de puertas y ventanas. Este procedimiento permite mantener una base común de comparación entre materiales con geometrías distintas.

Estos valores se tomaron como referencia para determinar la cantidad necesaria del material de construcción a utilizar que genere menor impacto ambiental. Para realizar la comparación de la cantidad de materiales empleados para la unidad funcional se procede mediante las fórmulas a establecer el número de bloques para la vivienda.

$$Nº\ bloques\ a\ lo\ largo\ pared\ lateral = \frac{longitud\ de\ la\ pared}{longitud\ del\ bloque + espesor\ cemento}$$

$$Nº\ bloques\ a\ lo\ alto\ de\ la\ pared\ lateral = \frac{altura\ de\ la\ pared}{altura\ del\ bloque + espesor\ cemento}$$

- Medidas del Ladrillo Tochano: **40x20x10cm**.
- Medidas del Bloque de Hormigón de Áridos naturales y reciclados: **40x20x15cm**.
- Medidas del BTC con CAL y CTO **29x14x9cm**.

La Tabla 3 resume el número total de bloques requerido para cada opción constructiva. Este cálculo constituye el paso intermedio entre los datos unitarios obtenidos de la literatura y los impactos totales aplicados a la vivienda prototipo.

Tabla 3

Total de bloques de cada material

	Nº de bloques
Ladrillo tochano	1541
Bloque de hormigón convencional	1541
Bloque de hormigón con áridos reciclados	1541
BTC con CAL	2909
BTC con CTO	2909

Nota. Cálculo propio a partir del área total de muros de la vivienda prototipo y de las dimensiones nominales de cada bloque. No se consideraron losa ni cimentación.

Los resultados evidencian que la vivienda requiere 1541 unidades en el caso del ladrillo tochano y de los bloques de hormigón, mientras que los BTC exigen 2909 unidades. Esta diferencia se explica por las dimensiones de cada pieza y resulta metodológicamente relevante, ya que el impacto total no depende únicamente del desempeño unitario del material, sino también de la cantidad efectivamente necesaria para construir los muros del prototipo.

En consecuencia, un material con menores impactos por bloque no necesariamente presenta el menor impacto total en la vivienda. Por ello, la comparación final debe realizarse con base en los valores agregados de la unidad funcional y no solo en los indicadores unitarios.

Una vez determinada la cantidad de bloques por material, se procedió a calcular las emisiones y la energía incorporada totales para la vivienda prototipo. La Tabla 4 sintetiza los resultados obtenidos al multiplicar los impactos unitarios por el número de bloques correspondiente a cada alternativa.

Tabla 4

Impactos totales para la vivienda prototipo

Material	Número de bloques	Emisiones totales kg CO_2-eq	Energía incorporada total MJ
Ladrillo tochano	**1541**	1606,03	14396,48
Bloque de hormigón convencional		1094,11	9461,74
Bloque de hormigón con áridos reciclados		1818,38	N.R.
Bloque de tierra comprimida con CAL (10%)	**2909**	1207,24	7103,49
Bloque de tierra comprimida con		1210,14	6200,82

CTO (10%)

Nota. Resultados obtenidos a partir de la multiplicación de los impactos unitarios reportados en la Tabla 2 por el número total de bloques de la Tabla 3. N.R. = no reportado.

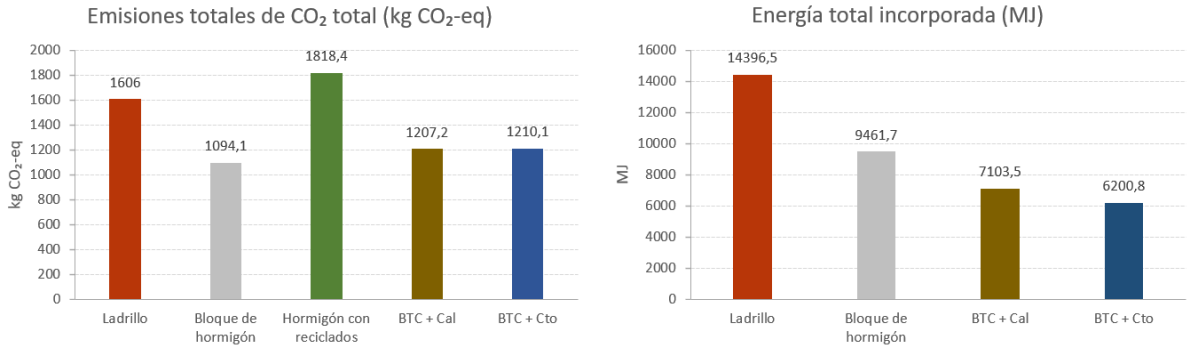
En términos de emisiones totales de CO_2-eq, el bloque de hormigón convencional presenta el menor valor del conjunto, con 1094,11 kg CO_2-eq para la unidad funcional considerada. Le siguen el BTC con cal y el BTC con cemento ordinario, cuyos resultados son próximos entre sí. Aunque ambos BTC muestran los menores impactos unitarios, su ventaja en carbono se reduce al pasar a la escala de la vivienda, debido al mayor número de unidades requerido para conformar los muros.

En relación con la energía incorporada total, la tendencia favorece con mayor claridad a los bloques de tierra comprimida. El BTC con cemento ordinario registra el menor valor, seguido por el BTC con cal, mientras que el ladrillo tochano presenta el mayor requerimiento energético. Esto indica que, aun cuando la cantidad de piezas aumenta, los BTC mantienen una ventaja importante en el consumo energético asociado a la fabricación del material. En el caso del bloque de hormigón con áridos reciclados, la comparación energética no puede completarse por ausencia de datos reportados en la fuente.

Con el propósito de facilitar la lectura comparativa de ambos indicadores, los resultados totales se representan de forma gráfica en la Figura 2.

Figura 2

Comparación de los impactos ambientales totales para la vivienda prototipo



Nota. Elaboración propia con base en los resultados de la Tabla 4.

La Figura 2 permite visualizar de forma sintética las diferencias entre materiales en términos de emisiones y energía incorporada. En conjunto, los resultados muestran que no existe una alternativa única que domine en todos los indicadores: el bloque de hormigón convencional presenta la menor huella de carbono total, mientras que el BTC con cemento ordinario registra la menor energía incorporada total. Por tanto, la elección del material depende del peso relativo que se otorgue a cada indicador dentro del diseño sostenible de la vivienda. Aunque el bloque de hormigón evidenció la menor huella de carbono, el BTC con cal, se considera la alternativa más pertinente para el prototipo sostenible, debido a la menor energía incorporada frente a materiales convencionales, su origen natural y su potencial de disposición final menos problemática en consideración con materiales de base industrial o reciclados. Por ello, se incorpora como la opción constructiva en la propuesta de vivienda sostenible analizada.

Figura 3

Bloque de tierra comprimida con cal elaborados para el prototipo



Nota. Elaboración propia.

A partir de esta comparación, el análisis se desplaza hacia el componente energético operativo del prototipo, con el fin de valorar en qué medida la incorporación de un sistema fotovoltaico permite reducir la dependencia de la red eléctrica y reforzar el desempeño ambiental global de la propuesta.

4.1.2. Evaluación energética

Además del impacto asociado a los materiales de construcción, se evaluó la demanda energética de la vivienda prototipo y la capacidad de un sistema fotovoltaico para cubrirla. Este análisis responde al segundo objetivo específico de la investigación, al relacionar el consumo eléctrico estimado del prototipo con distintos escenarios de generación solar.

Para estimar la demanda se consideraron cargas domésticas de uso frecuente en una vivienda unifamiliar y su tiempo promedio de operación diaria. La Tabla 5 presenta el consumo adoptado para el caso de estudio.

Tabla 5

Consumo energético de la vivienda prototipo

Carga	Cantidad	Potencia	Uso Horas/día	Energía Wh/día
Computadora	1	150	4	600
Televisor	1	150	3	450
Refrigeradora	1	90	20	1800
Lámparas led	9	18	5	810
Ventilador pequeño	1	50	5	250
Lavadora	1	200	1	200
Licuadora	1	600	0.01	6
Cargador (celular)	3	10	1	30
Ventilador grande	1	54	2	108
Total				4254

Nota. Potencias nominales referenciales adoptadas para el caso de estudio. El consumo diario se calculó a partir del producto entre cantidad, potencia y horas de uso.

El consumo total estimado asciende a 4254 Wh/día, equivalente a 4,25 kWh/día o 1552,71 kWh/año. Este valor constituye la base del dimensionamiento fotovoltaico y permite

estimar la potencia instalada necesaria para cubrir de manera total o parcial la demanda del prototipo.

Desde el punto de vista del consumo, la mayor incidencia corresponde a las cargas permanentes o de uso prolongado, por lo que el diseño del sistema debe prestar especial atención a estos equipos. En consecuencia, la demanda diaria calculada no solo define el número de módulos fotovoltaicos, sino también la capacidad de almacenamiento, el regulador y el inversor requeridos.

$\boldsymbol{L_{md}} = 4254\ Wh/día$

$\boldsymbol{PR}\ = 90\%$, cifra a considerar para el sistema autónomo.

Factor seguridad $\boldsymbol{F_c} = 30\%$

$Horas\ solar\ pico\ \boldsymbol{HSP} = 4.20.$

Según la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA, 2026), la hora solar pico es de 4.20, para la ciudad de Milagro en base a un promedio de la irradiancia del año 2025.

En la Tabla 6 se presenta información de los componentes utilizados para el cálculo de los diferentes escenarios del sistema fotovoltaico.

Tabla 6

Especificaciones técnicas de los componentes para el cálculo

Módulo Gi-Power GP-150P-36	**Batería Aokly Tipo Gel _ciclo profundo**
Voltaje nominal: 12V	Voltaje nominal: 12V
Corriente máxima: 8.02A	Capacidad: 200Ah
Potencia: 150W	DOD: 60% (Profundidad de descarga adoptada)
Dimensiones: 1480 x 670 x 35mm	

Nota. Fuente: Elaboración propia en base a (MIVISOL, 2026; SOLPHOWER, 2026).

Con base en la hora solar pico considerada para Milagro y en las especificaciones técnicas de los componentes seleccionados, se dimensionaron varios escenarios de abastecimiento fotovoltaico. El objetivo fue comparar una alternativa autónoma con otras opciones de cobertura parcial, a fin de identificar la configuración más coherente con la propuesta de vivienda sostenible planteada en esta investigación, los sistemas serán constituidos en arreglo de conexión en paralelo.

Un sistema autónomo

$$Núm.\,de\ paneles = \frac{\boldsymbol{L_{md}} * (1 + F_c)}{HSP * P * PR} = \frac{4254 * (1 + 0.3)}{4.20 * 150 * 0.9} = 9.75$$

Total, se requiere **10 paneles**.

$$I\ regulador = Isalida\ del\ arreglo\ de\ paneles * 1.25$$

$$I\ regulador = 80.2A * 1.25 = 100.25$$

Es decir, se requiere de un **regulador con corriente de 110A y 18,7V**

$$P\ inversor = P\ total * 1{,}5\ Factor\ de\ seguridad = 1486 * 1{,}5 = 2229\ W$$

Puesto que los inversores van de 250 en 250 W, se requiere un Inversor de 2500 W en caso de aumentar el número de electrodomésticos a futuro se recomienda adquirir un inversor de mayor potencia que soporte todas las cargas por ejemplo uno de **3000 W**.

$$Cantidad\ de\ baterías = \frac{(Energía\ de\ consumo * 1.3) \times Días\ de\ autonomía}{(Pot.de\ la\ batería * 0.6 * 0.9)}$$

$$Cantidad\ de\ baterías = \frac{(5530.2) \times 2}{(2400 * 0.6 * 0.9)} = 8{,}53$$

Redondeando, se requieren **9 baterías**, para 2 días de autonomía.

a. Un sistema interconectado con ahorro del 90% de energía

$$\boldsymbol{L_{md}} = 4254\ \frac{Wh}{día} * 0.9 = 3828.6\ \frac{Wh}{día}$$

$$No.\,de\,paneles = \frac{(Consumo\,de\,energía * \%\,de\,ahorro)}{(Pot.de\,los\,paneles * HSP)}$$

$$No.\,de\,paneles = \frac{(3828.6)}{(150 * 4.2)} = 6{,}08$$

Redondeando se requieren **7 paneles**.

$$I\,regulador = Isalida\,del\,arreglo\,de\,paneles * 1.25$$

$$I\,regulador = 56{,}14\,A * 1.25 = 70{,}18\,A$$

Dado el valor se requiere un **regulador de 80A y 18.7V**.

$$P\,inversor = P\,total * 1{,}5\,Factor\,de\,seguridad = 1486 * 1{,}5 = 2229\,W$$

Se requiere un **Inversor de 2500W.**

b. Un sistema interconectado con ahorro del 70% de energía

$$No.\,de\,paneles = \frac{(Consumo\,de\,energía * \%\,de\,ahorro)}{(Pot.de\,los\,paneles * HSP)}$$

$$No.\,de\,paneles = \frac{(4254 * 0.7)}{(150 * 4.2)} = 4.73$$

Total, se requieren **5 paneles** para cubrir con el 70 % de ahorro.

$$I\,regulador = Isalida\,del\,arreglo\,de\,paneles * 1.25$$

$$I\,regulador = 40.1A * 1.25 = 50.13$$

Con el valor estimado se necesita un **regulador de 60A y 18.7V**.

$$P\,inversor = P\,total * 1{,}5\,Factor\,de\,seguridad = 1486 * 1{,}5 = 2229\,W$$

Se requiere un **Inversor de 2500W.**

Este ahorro del 70% de energía que lo proporcionará los paneles solares con 3150 Wh/día puede ser utilizado para distribuir la energía a todas las cargas excepto la

refrigeradora que se abastecerá de la red eléctrica.

c. Un sistema interconectado con ahorro del 50% de energía

$$No.\,de\ paneles = \frac{(Consumo\ de\ energía * \%\ de\ ahorro)}{(Pot.\,de\ los\ paneles * HSP)}$$

$$No.\,de\ paneles = \frac{(4254 * 0.5)}{(150 * 4.2)} = 3.38$$

Redondeando se utilizará **4 paneles**.

$$I\ regulador = Isalida\ del\ arreglo\ de\ paneles * 1.25$$

$$I\ regulador = 32.08A * 1.25 = 40.1$$

El **regulador debe ser de 50A y 18.7V**.

$$P\ inversor = P\ total * 1{,}5\ Factor\ de\ seguridad = 1486 * 1{,}5 = 2229\ W$$

El inversor será de **2500W.**

Se determinó que el sistema aportará 2520 Wh/día, equivalente al 50% del consumo, el restante será abastecido por la red eléctrica.

Tabla 7

Producción energética estimada para los escenarios fotovoltaicos analizados

Escenario	Paneles	Potencia instalada	Producción diaria	Producción anual	Cobertura objetivo de la demanda
Autónomo	10	1,50 kWp	5,67 kWh/día	2069,55 kWh/año	100%
90%	7	1,05 kWp	4,41 kWh/día	1609,65 kWh/año	90%
70%	5	0,75 kWp	3,15 kWh/día	1149,75 kWh/año	70%
50%	4	0,60 kWp	2,52 kWh/día	919,80 kWh/año	50%

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Posterior se verifica la viabilidad de la estructura de la casa efectuando las mediciones necesarias para determinar la longitud del cableado y elaborar el diagrama eléctrico en el que

se indica la ubicación de los componentes para la realización del diseño.

Entre las alternativas evaluadas, el escenario autónomo se adopta como propuesta principal, ya que es el único que busca cubrir la totalidad de la demanda estimada de la vivienda sin depender del suministro convencional. Esta selección también mantiene coherencia con el desarrollo posterior del diseño, puesto que tanto la disposición de los módulos sobre la cubierta como la estimación referencial de costes se elaboran a partir de esta configuración.

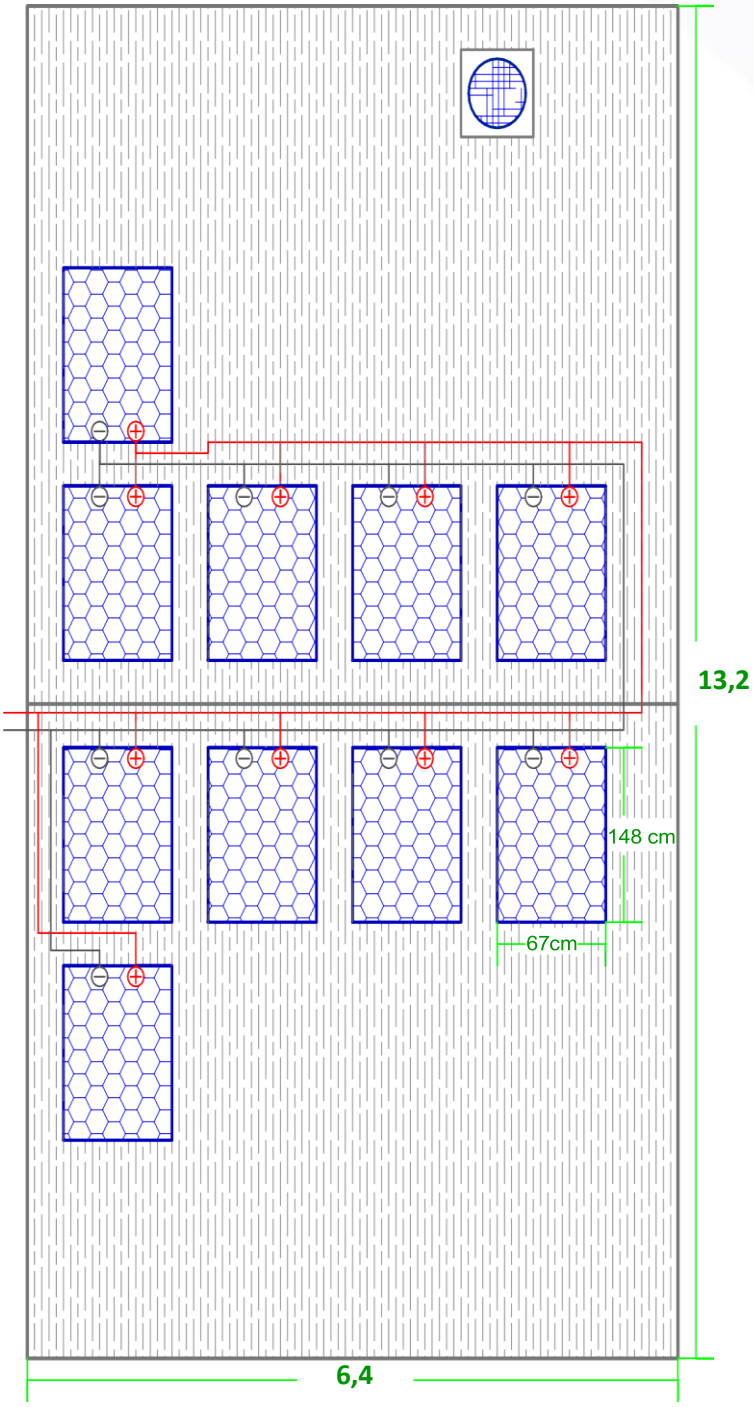
Las opciones de cobertura parcial reducen el número de paneles y, previsiblemente, la inversión inicial; sin embargo, continúan dependiendo de la red eléctrica para abastecer una fracción del consumo diario. Por ello, aunque estas alternativas pueden resultar viables desde una lógica de ahorro parcial, no responden con la misma fuerza al criterio de autosuficiencia energética adoptado para el prototipo.

Debe precisarse, además, que la elección de un sistema autónomo implica operar de manera independiente de la red eléctrica. En consecuencia, si se quisiera considerar la inyección de excedentes, sería necesario reformular la propuesta como un sistema interconectado o híbrido, con equipos y condiciones regulatorias compatibles con esa modalidad.

Una vez seleccionado el escenario principal, se verificó la posibilidad de implantar el arreglo fotovoltaico sobre la cubierta de la vivienda prototipo. La Figura 3 muestra la disposición referencial de los módulos sobre el tejado.

Figura 4

Techo con el arreglo de los módulos fotovoltaicos sistema autónomo



Nota. Distribución referencial de los módulos fotovoltaicos correspondiente al escenario autónomo seleccionado.

La figura confirma que la cubierta dispone del espacio necesario para alojar el número de módulos previsto en el escenario autónomo, lo que respalda la factibilidad física de la propuesta. Su inclusión dentro del cuerpo del capítulo es pertinente, ya que conecta los

cálculos energéticos con una solución espacial concreta del prototipo.

4.1.3. Estimación referencial de costos del sistema fotovoltaico

Finalmente, se elaboró una estimación referencial de costes para el escenario autónomo seleccionado, tomando como base precios de mercado consultados en junio de 2026. Este ejercicio no constituye un presupuesto ejecutivo, sino una aproximación económica que permite valorar el orden de magnitud de la inversión requerida.

Tabla 8

Costos referenciales del sistema fotovoltaico autónomo.

Componente	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Panel Fotovoltaico	10	$105	$1050
Inversor (de 3 kW)	1	$470	$470
Regulador de voltaje (1)	1	$300	$300
Caja de Conexiones (10)	10	$19,21	$192,1
Batería (9)	9	$253	$2277
Cableado (30.2m)	30,2	$168,94	$168,94
Mano de obra		$1300	$1300
Gastos extra		$2000	$2000
Total			$7758,04

Nota. Elaboración propia con base en precios referenciales publicados por (Genera tu energía, 2026; KoryTech, 2026; MIVISOL, 2026; PROVIENTO, 2026; SOLPHOWER, 2026). Los valores pueden variar según disponibilidad, marca y condiciones de instalación.

Los valores corresponden a consultas efectuadas en junio del 2026 y pueden variar dependiendo del proveedor. La estimación económica muestra que el escenario autónomo implica una inversión inicial superior a la de los esquemas de cobertura parcial, principalmente por el número de módulos y baterías necesarios. No obstante, esta inversión se justifica dentro de la lógica de la propuesta, ya que permite abastecer completamente la demanda prevista y reducir la dependencia de la red eléctrica.

En síntesis, la evaluación energética evidencia que la incorporación de energía solar fotovoltaica es técnicamente viable en la vivienda prototipo y que el escenario autónomo constituye la alternativa más coherente con el enfoque de sostenibilidad adoptado en la investigación. Este resultado complementa la comparación ambiental de materiales realizada en el apartado anterior y refuerza la pertinencia de integrar estrategias activas en el diseño de la vivienda.

4.1.4. Diagnóstico del Índice Verde Urbano y cubiertas verdes

El objetivo específico del estudio es cuantificar el déficit de áreas verdes de Milagro y evaluar el aporte potencial de las cubiertas verdes. Se digitalizaron las áreas verdes urbanas públicas en QGIS (Figura 5) y se sumó su superficie total. El resultado fue 220364,05 m^2. Con una población urbana de 159970 habitantes, el IVU calculado es:

$$IVU = \frac{Área\ verde\ urbana\ total}{Población\ urbana}$$

$$IVU = \frac{220364{,}05\ m^2}{159970\ hab} = 1{,}38\ m^2/hab$$

Dado que la OMS recomienda al menos 9,00 m^2/hab, el déficit es:

$$Déficit\ por\ habitante = 9\ m^2/hab - 1{,}38\ m^2/hab = 7{,}62\ m^2/hab$$

Esto equivale a un déficit por habitante de 7,62 m^2/hab. A partir de este déficit, el déficit total de áreas verdes se calculó como se presenta a continuación:

$$Déficit\ total = (9\ m^2/hab * 159970\ hab) - 220364{,}05\ m^2$$

$$Déficit\ total = 1439730\ m^2 - 220364{,}05\ m^2 = 1219365{,}95\ m^2$$

En la Figura 5 se muestra el mapa de áreas verdes públicas de Milagro, utilizado para este cálculo y la Tabla 8 resume los indicadores clave.

Figura 5

Distribución espacial de áreas verdes urbanas en la ciudad de Milagro



Fuente: Esri World Imagery y Google Earth (verificación visual).
Elaboración: propia mediante QGIS, 2026.

Tabla 9

Resumen del IVU calculado para Milagro

Indicador	Valor
Área verde pública total	220364,05 m^2
Población urbana	159970 hab
IVU calculado	1,38 m^2/hab
Parámetro de referencia	9,00 m^2/hab
Déficit por habitante	7,62 m^2/hab
Déficit total	1219365,95 m^2

Nota. Datos del censo INEC (2022) y cálculo propio. El parámetro de 9,00 m^2/hab corresponde al mínimo OMS.

4.1.5. Área piloto de cubiertas verdes

Como complemento, se analizó un sector piloto de 5 manzanas (Figura 6). En esta área se digitalizaron 114 techos habitados, cuya superficie total es 12076,84 m^2. Considerando un factor de aptitud del 70% (por accesos, equipos y pendientes), el área potencial para cubiertas verdes es 8453,79 m^2. La Tabla 9 resume estos datos.

Figura 6

Área piloto de cinco manzanas y cubiertas potenciales identificadas



Fuente: Esri World Imagery y Google Earth para verificación visual.
Elaboración: propia mediante QGIS, 2026.

Nota. Elaboración propia en QGIS.

Tabla 10

Características del área piloto para cubiertas verdes.

Descripción	Valor
Cubiertas digitalizadas	114
Área total de techos	12076,84 m^2
Factor de aptitud estimado	70%
Área apta para cubierta verde	8453,79 m^2

Nota. El factor de aptitud considera la porción del techo utilizable para vegetación, descontando obstáculos.

La metodología en QGIS fue la siguiente:

- Delimitación del área urbana de Milagro y carga de capas base (ortofoto, censo municipal).
- Digitalización manual de polígonos de áreas verdes públicas y de cubiertas de techo en el área piloto.
- Cálculo de áreas con la calculadora de campos: el área de cada polígono se obtuvo mediante $área (en m^2).
- Para las cubiertas se aplicó la expresión en la calculadora de QGIS: $área * factor_apto * adopción para estimar el área vegetal potencial por escenario.

4.1.6. Escenarios de adopción de cubiertas verdes

Se evaluaron cuatro escenarios de cobertura de cubiertas vegetales: Actual (0%), 25%, 50% y 100% de las áreas aptas identificadas. La Tabla 10 muestra el área adicional de vegetación urbana, el aporte per cápita, el IVU potencial resultante y la reducción relativa del déficit para cada caso. Obsérvese que aun con adopción total el IVU aumenta solo de 1,38 a 1,43 m^2/hab y el déficit general disminuye <1%.

Tabla 11

Escenarios de aporte de cubiertas verdes y efectos sobre el IVU.

Escenario	Área verde añadida	Aporte (m^2/hab)	IVU potencial (m^2/hab)	Reducción del déficit (%)
Sin cubiertas (0%)	0,00 m^2	0,00	1,38	0,0 %
25% adopción	2113,45 m^2	0,01	1,39	0,2 %
50% adopción	4226,89 m^2	0,03	1,41	0,4 %
100% adopción	8453,79 m^2	0,05	1,43	0,7 %

Nota. El IVU potencial añade el aporte de cubiertas verdes al IVU actual calculado. No

equivale al IVU oficial del INEC. El área verde actual (220364 m^2) se mantuvo constante; se asume población fija. La reducción se refiere al porcentaje aproximado del déficit original cubierto por cada escenario.

Los resultados muestran que las cubiertas verdes reducen el déficit urbano de manera muy limitada. Incluso si el 100 % de las cubiertas aptas fueran vegetadas, el déficit de $1{,}22\times10^6$ m^2 se reduciría en solo 8453 m^2 (<0,7 %). En otras palabras, el IVU pasaría de 1,38 a 1,43 m^2/hab, muy por debajo del estándar de 9,00. Esto indica que las cubiertas verdes no sustituyen los parques y plazas, sino que los complementan. Actúan más bien como una infraestructura verde distribuida, mejorando microambientes locales (sombra, infiltración) pero sin resolver el déficit macro.

Para las autoridades municipales, esto sugiere varias acciones: Inventario y monitoreo: Registrar y actualizar la existencia de cubiertas verdes privadas, integrándolas al catastro urbano. Incentivos y educación: Promover incentivos fiscales o subvenciones para la vegetación de techos, junto con campañas de concienciación sobre sus beneficios. Planificación integral: Incluir las cubiertas verdes en la planificación urbana como parte de la estrategia de infraestructura verde, y desarrollar programas de gestión que permitan considerarlas en futuros cálculos del IVU oficial.

4.1.7. Síntesis integrada de resultados

En conjunto, los resultados obtenidos permiten observar que el desempeño ambiental de la vivienda prototipo no depende de una sola decisión aislada, sino de la articulación entre la selección de materiales, el aprovechamiento de energía solar y la incorporación de infraestructura verde. El análisis comparativo, sustentado en resultados de ACV reportados en estudios previos, evidenció diferencias relevantes entre las alternativas de mampostería en términos de huella de carbono y energía incorporada; de forma complementaria, el sistema fotovoltaico mostró un aporte favorable en la reducción estimada de la energía demandada a la red eléctrica convencional.

Figura 7

Vivienda prototipo sostenible analizada



Nota. En la imagen se observan, de forma integrada, la solución constructiva propuesta, la incorporación del sistema fotovoltaico y la cubierta verde como estrategias complementarias de sostenibilidad.

Desde esta perspectiva, la vivienda prototipo se configura como una propuesta de sostenibilidad, en la que los materiales constructivos de menor impacto, la generación solar y la cubierta verde actúan de manera complementaria. No obstante, la incorporación de cubiertas vegetales representa un aporte positivo, su efecto sobre el Índice Verde Urbano sigue siendo limitado frente al déficit existente en Milagro, donde el valor calculado fue de 1,38 m^2/hab y el déficit total alcanzó 1.219.365,95 m^2. Por ello, su principal valor radica en plantear una estrategia replicable que, si se aplica a mayor escala, podría contribuir al desarrollo de entornos urbanos más ecológicos.

CAPÍTULO V: Conclusiones, Discusión y Recomendaciones

5.1. Discusión

La vivienda prototipo no puede evaluarse desde un solo componente. En este estudio, materialidad, sistema fotovoltaico y cubierta verde operan en escalas distintas, pero terminan influyéndose entre sí. Leer el caso de esa manera permitió discutir la vivienda como un conjunto y no como una suma aislada de soluciones (Asdrubali et al., 2024).

En el componente material, el hallazgo principal no fue encontrar un ganador absoluto, sino ver cómo cambia la lectura cuando el análisis pasa del bloque aislado a la escala completa del prototipo. Al llevar la unidad funcional a 165 m² de muros, la jerarquía ambiental se modifica porque también cambia la cantidad real de piezas requeridas: el hormigón convencional mantiene la menor huella de carbono total, mientras que el BTC con cemento ordinario conserva la menor energía incorporada total. En otras palabras, el paso de la ficha técnica al muro completo modifica la jerarquía ambiental. Ese cambio se explica, en este caso, por la cantidad de piezas requeridas: 1541 unidades para ladrillo y bloques de hormigón, frente a 2909 BTC. Dicho de manera más simple, cuando se lleva el dato a obra, no basta con preguntar cuánto impacta un bloque; también hay que preguntar cuántos bloques hacen falta para levantar la misma vivienda.

Esta diferencia no debilita el estudio; al contrario, lo vuelve más honesto. Una buena parte de la investigación actual en ACV para edificación insiste en que los resultados comparativos dependen fuertemente de la unidad funcional, de la calidad de los inventarios y de la consistencia de los límites del sistema. Revisiones recientes muestran que, en construcción, el mayor problema no suele ser la ausencia de indicadores, sino la heterogeneidad metodológica: bases de datos diferentes, supuestos de transporte poco homogéneos, fronteras del sistema fragmentadas y uso intensivo de datos secundarios (Asdrubali et al., 2024). En esa línea, el presente trabajo debe leerse como un análisis comparativo sustentado en evidencia publicada y no como un ACV primario completo. Esa precisión es importante porque evita sobredimensionar el alcance de los resultados. Por

ejemplo, el bloque de hormigón con áridos reciclados no pudo compararse del todo en energía incorporada debido a la ausencia de ese dato en la fuente de referencia. La consecuencia es clara: la comparación existe, pero no es perfectamente simétrica.

Con todo, la elección del BTC para el prototipo sigue siendo defendible, siempre que se haga con una argumentación matizada. No sería correcto afirmar que fue la mejor alternativa en todo; sí lo es decir que resulta coherente con el enfoque sostenible de la propuesta. Aunque el hormigón convencional obtuvo el menor CO_2 total, el BTC mantiene una ventaja importante en energía incorporada, responde a una lógica de fabricación menos intensiva, trabaja con una base material más cercana a la tierra cruda estabilizada y, en términos de disposición final, plantea menos conflictos que soluciones de base industrial más rígidas. En una tesina aplicada como esta, esa coherencia pesa. La discusión, entonces, no debe forzar una victoria absoluta del BTC, sino mostrar que su pertinencia surge del equilibrio entre desempeño ambiental, posibilidad constructiva y sentido territorial.

En el plano energético, la vivienda prototipo presenta una demanda diaria de 4254 Wh, equivalente a 1552,71 kWh/año. A partir de esa demanda se seleccionó un sistema autónomo de 10 paneles, con una producción estimada de 2069,55 kWh/año. Eso significa que la generación anual proyectada es aproximadamente 1,33 veces la demanda anual estimada, una relación que no debe verse como un “exceso” sin explicación, sino como una condición bastante razonable para sistemas aislados, donde no solo importa el balance anual, sino la autonomía, las pérdidas y la estabilidad del suministro. De hecho, el propio entorno metodológico de PVGIS para sistemas off-grid trabaja con variables de este tipo: potencia instalada, capacidad de batería, límite de descarga, consumo diario, pendiente y orientación; y entrega resultados sobre días con batería llena o vacía y energía faltante, justo el tipo de lógica que subyace al dimensionamiento adoptado en el estudio (Comisión Europea, 2025).

Ahora bien, técnicamente viable no significa automáticamente fácil de implementar. En este punto, los resultados del caso de Milagro son interesantes porque ponen en evidencia algo que suele pasar desapercibido en los discursos más optimistas sobre energía solar: hoy

el panel ya no se lleva, por sí solo, todo el peso económico del sistema. A nivel internacional, la solar fotovoltaica ha reducido de forma sostenida su costo y se ha consolidado como una de las opciones más competitivas de nueva generación eléctrica. IRENA reporta que, entre 2022 y 2023, el costo nivelado promedio de la electricidad de nuevos proyectos solares fotovoltaicos a gran escala cayó 12 %, y que en 2023 la solar fotovoltaica ya era 56 % más barata que el promedio ponderado de las alternativas fósiles equivalentes (IRENA, 2024). En paralelo, la IEA señala que las baterías de ion-litio redujeron sus precios en torno al 90 % desde 2010, pasando de aproximadamente USD 1400/kWh a menos de USD 140/kWh en 2023 (IEA, 2024).

Ese descenso cambia la conversación, pero no la simplifica del todo. En el caso analizado, el costo total del sistema autónomo asciende a $7758,04 y los rubros con mayor incidencia no son solo los módulos. Las baterías representan 29,35 % del total, los gastos extra 25,78 % y la mano de obra 16,76 %. Visto así, la experiencia del prototipo deja una escena bastante concreta: en el imaginario, el panel suele ser “la tecnología cara”; en la hoja de costos, en cambio, el peso real se reparte entre almacenamiento, instalación y componentes auxiliares. Por eso, la discusión conviene decir algo más fino que “la fotovoltaica es cara”. Lo más preciso sería señalar que la caída internacional del costo de los módulos ha mejorado mucho la accesibilidad de esta tecnología, pero en sistemas residenciales autónomos el costo sigue fuertemente condicionado por el banco de baterías, la instalación y el balance of system. La ventaja del estudio es que no deja esa afirmación en abstracto: la aterriza en una vivienda concreta y en una estimación local de mercado.

Además, la comparación entre escenarios refuerza una idea metodológica importante. Las alternativas interconectadas con coberturas parciales del 90 %, 70 % y 50 % son financieramente menos exigentes, pero mantienen dependencia de la red. El escenario autónomo, en cambio, es el único que sostiene con claridad el criterio de autosuficiencia adoptado para el prototipo. Esto no significa que sea la respuesta más económica en cualquier contexto, sino que es la más coherente con la lógica experimental de la

investigación. Ahí está, de hecho, uno de los aportes del trabajo: mostrar que la sostenibilidad residencial no necesariamente coincide con la solución de menor inversión inicial, sino con aquella que mejor alinea objetivos ambientales, viabilidad técnica y propósito del diseño.

La tercera línea de discusión corresponde al IVU y a las cubiertas verdes. Aquí los resultados obligan a una lectura más moderada. Milagro presenta un IVU de 1,38 m^2/hab y un déficit total de 1.219.365,95 m^2. A partir del área piloto se digitalizaron 114 techos y se estimó una superficie apta de 8453,79 m^2 para cubiertas verdes. Sin embargo, incluso si el 100 % de esa superficie se incorporara como infraestructura verde, el IVU apenas subiría hasta 1,43 m^2/hab. Este dato vale mucho precisamente porque evita una sobrepromesa. Las cubiertas verdes ayudan, pero no corrigen por sí solas un déficit urbano de esa magnitud.

Esta conclusión encuentra apoyo en estudios recientes de escala urbana. Shao y colaboradores, al evaluar prioridades y beneficios de roof greening con datos geoespaciales detallados, encontraron que los techos verdes pueden mejorar notablemente la exposición a espacios verdes y producir beneficios económicos, pero su efecto agregado sobre la mitigación térmica urbana y la compensación anual de carbono puede seguir siendo pequeño cuando se lo mira a escala de ciudad. En su caso, el efecto sobre calor urbano fue del orden de 0,15 °C y el aporte anual al balance de carbono se mantuvo alrededor de 0,8 % (Shao et al., 2024). Eso no invalida la estrategia; más bien ayuda a ubicarla en su escala correcta. En Milagro, las cubiertas verdes no sustituyen parques, plazas ni corredores verdes de mayor tamaño. Funcionan mejor como una infraestructura verde distribuida, con capacidad para mejorar el microclima inmediato, aportar sombra, infiltrar agua y reforzar una cultura urbana más sensible al confort térmico.

Desde el punto de vista metodológico, el trabajo también se fortalece por la forma en que se aproximó al indicador. Necula y colaboradores muestran que índices de verde urbano pueden construirse con datos de teledetección gratuitos, combinando imágenes satelitales y procedimientos de análisis espacial (Necula et al., 2024). En una línea similar, Boeing y su equipo destacan el valor de los datos abiertos y del software libre para producir indicadores

urbanos comparables y útiles para la planificación (Boeing et al., 2022). El uso de QGIS para digitalizar áreas verdes y techos en esta tesina va justamente en esa dirección. No se trata solo de una herramienta de apoyo gráfico; es parte de la validez del procedimiento. En ese sentido, uno de los detalles más interesantes del estudio es que la cubierta verde dejó de ser una imagen de diseño y pasó a convertirse en un dato urbano medible.

En conjunto, los resultados permiten responder la hipótesis de manera matizada. La evidencia obtenida respalda parcialmente la idea de que la integración de estrategias constructivas sostenibles mejora el desempeño ambiental de la vivienda prototipo y aporta, aunque de forma limitada, al desarrollo urbano ecológico. La respalda porque el estudio demuestra que el uso de BTC reduce de forma importante la energía incorporada respecto de materiales convencionales; que un sistema fotovoltaico autónomo puede cubrir técnicamente la demanda del prototipo y disminuir su dependencia de la red; y que las cubiertas verdes, aun con un efecto modesto sobre el IVU, sí amplían la discusión de la vivienda hacia la infraestructura verde urbana. Pero la respalda solo parcialmente porque ninguna de estas estrategias resuelve por sí sola el problema completo. El BTC no domina todos los indicadores ambientales, el sistema fotovoltaico exige una inversión inicial alta y las cubiertas verdes tienen un alcance urbano claramente insuficiente si no se replican a mayor escala.

Dicho de otra forma, el estudio no demuestra que exista una solución perfecta, sino algo más útil: que una vivienda mejor pensada puede reunir decisiones materiales, energéticas y urbanas que, al combinarse, producen una mejora ambiental más consistente que cualquiera de esas decisiones por separado. En un contexto como Milagro, donde el problema térmico, la dependencia energética y el déficit de áreas verdes conviven en la misma realidad urbana, esa lectura integrada parece más valiosa que la búsqueda de un único indicador vencedor.

5.2. Conclusiones

El estudio cumplió su objetivo general al analizar, de manera integrada, el

comportamiento ambiental de una vivienda prototipo en Milagro que combina muros con materiales alternativos, sistema fotovoltaico y cubierta verde. En conjunto, los resultados muestran que esta integración sí mejora el desempeño ambiental de la propuesta frente a una lectura convencional del diseño de vivienda, pero también dejan ver que no existe una solución única que resuelva por sí sola todas las dimensiones del problema. La hipótesis inicial, por tanto, se respalda en lo esencial: la articulación entre materialidad, energía y vegetación aporta de forma positiva, aunque con alcances y límites diferentes según la escala en la que se observe el proyecto.

En el componente material, la comparación de ciclo de vida no dejó un ganador absoluto. Para una unidad funcional de 165 m² de muros, el bloque de hormigón convencional presentó una mejor respuesta en huella de carbono total, mientras que el BTC estabilizado con cal mantuvo una lectura favorable cuando se observó la energía incorporada y la coherencia general con una lógica constructiva de menor intensidad industrial. Eso vuelve más interesante el resultado, porque obliga a salir de la idea simplificada de que el material "más sostenible" es el que domina todos los indicadores. En este caso, el BTC se considera pertinente no porque haya superado a todas las alternativas en todo, sino porque ofrece un equilibrio compatible con la propuesta del prototipo, su proceso de elaboración y una disposición final menos problemática que otras opciones de mayor procesamiento.

En el plano energético, la vivienda mostró una demanda de 4254 Wh/día, equivalente a 1552,71 kWh/año, y ese valor permitió dimensionar un sistema fotovoltaico autónomo de 10 paneles con banco de baterías. Desde el punto de vista técnico, la solución es viable para abastecer la demanda prevista del prototipo y reducir la dependencia de la red. Sin embargo, el análisis económico deja claro que la decisión no depende solo del rendimiento energético. El costo total referencial de $7758,04, con un peso importante en baterías ($2277), gastos extra ($2000) y mano de obra ($1300), muestra que la autosuficiencia energética es posible, pero todavía exige una inversión inicial considerable para una vivienda de este tipo. En otras palabras, la viabilidad técnica es alta, pero la viabilidad de implementación masiva depende

de cómo se resuelva el componente económico.

En la dimensión urbana, el diagnóstico del Índice Verde Urbano confirmó que Milagro mantiene una relación muy baja entre área verde y población. El IVU actual de 1,38 m^2/hab evidencia un déficit importante frente a referencias internacionales, y el escenario de incorporación de cubiertas verdes apenas lo eleva a 1,43 m^2/hab, aun considerando un área apta de 8453,79 m^2. Ese resultado es valioso precisamente porque pone la propuesta en su justa medida: la cubierta verde sí aporta, pero su efecto es complementario y no sustitutivo. Sirve para sumar superficie vegetal, mejorar el desempeño ambiental del edificio y reforzar la discusión sobre infraestructura verde, pero no reemplaza la necesidad de parques, arborización, recuperación de vacíos urbanos y políticas públicas de mayor alcance.

Uno de los aportes más claros de esta tesina está en la forma en que articula escalas que usualmente se estudian por separado. En lugar de revisar solo el material, solo la energía o solo el déficit verde urbano, el trabajo los reúne en una misma vivienda prototipo y los aterriza al caso de Milagro. Ese cruce entre análisis de ciclo de vida, consumo operativo y potencial de cubierta verde permite leer la vivienda como una pieza ambientalmente activa dentro de la ciudad. Más que ofrecer una receta cerrada, la investigación deja una base metodológica útil para seguir diseñando, evaluando y ajustando soluciones de vivienda sostenible en contextos urbanos de la Costa ecuatoriana.

5.3. Recomendaciones

Las siguientes recomendaciones se derivan directamente de los resultados obtenidos y de los límites metodológicos del estudio. No buscan corregir lo ya desarrollado, sino señalar con más claridad qué convendría mejorar en una fase posterior y qué líneas de trabajo podrían fortalecer tanto la validez técnica de la investigación como su aplicación práctica en Milagro u otros contextos similares.

5.3.1. Limitaciones del estudio

La principal limitación del estudio se ubica en el componente material. La comparación

ambiental de los muros se construyó con datos secundarios provenientes de estudios distintos, por lo que existen diferencias posibles en fronteras del sistema, supuestos de transporte, bases de datos y contextos productivos que pueden afectar la comparabilidad fina entre alternativas.

En el componente energético, el dimensionamiento del sistema fotovoltaico se elaboró a partir de una demanda estimada de diseño, no desde el monitoreo de una vivienda real en uso. Eso permite una aproximación técnica consistente, pero no reemplaza el comportamiento real de consumo, ni las variaciones estacionales o de hábitos de ocupación.

En el componente urbano, la evaluación de cubiertas verdes se desarrolló sobre un escenario espacial acotado, con un área apta estimada de 8453,79 m^2, y no sobre la totalidad del cantón. Por eso, el paso de 1,38 a 1,43 m^2/hab debe leerse como una estimación de aporte potencial y no como una transformación estructural del IVU de Milagro.

5.3.2. Recomendaciones prácticas y de investigación

Conviene desarrollar, en una fase posterior, un ACV primario con datos locales para BTC, bloque de hormigón y otras alternativas disponibles en Ecuador. Eso permitiría trabajar con inventarios más homogéneos, incorporar transporte, fabricación y fin de vida bajo un mismo marco metodológico y reducir la incertidumbre asociada a la comparación entre materiales. La literatura reciente insiste justamente en que el ACV en edificación necesita mayor consistencia entre materiales, energía y contexto, y que las comparaciones tempranas deben explicitar mejor sus supuestos y márgenes de incertidumbre.

Sería útil replantear el análisis fotovoltaico en clave comparativa, contrastando el sistema autónomo con escenarios híbridos o interconectados a red, en función de lo que se priorice. Esta recomendación no invalida la propuesta actual; al contrario, la fortalece, porque herramientas oficiales como PVGIS permiten evaluar tanto sistemas conectados a red como off-grid, considerando potencia instalada, capacidad de batería, límite de descarga y consumo diario. Además, IRENA reporta que en 2023 el costo nivelado de la solar fotovoltaica a escala

comercial cayó 12 % respecto a 2022 y que los costos de proyectos de almacenamiento en baterías se redujeron 89 % entre 2010 y 2023, lo que vuelve especialmente pertinente comparar configuraciones tecnológicas y económicas antes de escalar la propuesta.

Para mejorar la robustez del componente energético, se recomienda incorporar un monitoreo real de demanda en una vivienda piloto o, al menos, construir perfiles horarios más detallados de consumo. PVGIS, por ejemplo, admite tanto un valor de consumo diario como la carga de datos de consumo para simulaciones; aprovechar esa lógica ayudaría a pasar del dimensionamiento referencial a una validación operativa más próxima al uso real.

En la parte económica, sería conveniente presentar el sistema fotovoltaico con una desagregación más visible de costos entre módulos, almacenamiento, inversor, regulador, estructura, instalación y gastos indirectos. Esta recomendación cobra sentido porque el mercado solar ha cambiado mucho: la fotovoltaica ya se ubica como una de las fuentes de nueva generación más competitivas y el almacenamiento ha reducido drásticamente sus costos, pero en sistemas autónomos el peso del banco de baterías y del montaje sigue siendo decisivo en la inversión inicial. Ese matiz ayudaría a explicar mejor por qué, aun con la mejora tecnológica global, el componente económico todavía condiciona la adopción doméstica.

En relación con el IVU, se recomienda ampliar el análisis espacial mediante SIG, datos abiertos y teledetección, de modo que no se limite a un sector piloto, sino que pueda replicarse sobre más barrios o incluso sobre toda el área urbana del cantón. Estudios recientes muestran que el uso de datos abiertos y software libre permite construir indicadores urbanos comparables y reproducibles.

También sería importante evaluar las cubiertas verdes con variables adicionales al IVU, por ejemplo, temperatura superficial, confort térmico interior, manejo de escorrentía, mantenimiento y biodiversidad. La evidencia reciente sugiere que el reverdecimiento de techos sí puede mejorar la exposición a áreas verdes y generar beneficios urbanos relevantes, pero su aporte en mitigación térmica o compensación de carbono puede ser más

moderado de lo que a veces se supone. En ese sentido, una segunda fase experimental permitiría entender mejor qué tan útiles son en el clima cálido-húmedo de Milagro y bajo qué condiciones conviene promoverlas.

Finalmente, se recomienda que la propuesta no se interprete como una solución aislada de edificio, sino como parte de una agenda urbana más amplia. Las cubiertas verdes pueden sumar superficie vegetal; los paneles solares pueden apoyar la generación distribuida; y los materiales de menor intensidad ambiental pueden mejorar la lógica constructiva. Pero, para que el impacto trascienda el nivel del prototipo, esta línea de trabajo debería conectarse con estrategias municipales de arborización, recuperación de espacios residuales, parques de proximidad, actualización cartográfica periódica y monitoreo territorial con herramientas geoespaciales abiertas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvear Calle, I. A., Sánchez, A. J. H., Tapia Abril, A. E., Ordoñez Alvarado, G., Aragón, M., Flores, C., Heredia, E., Alvear Calle, I. A., Sánchez, A. J. H., Tapia Abril, A. E., Ordoñez Alvarado, G., Aragón, M., Flores, C., & Heredia, E. (2016). Declaraciones consensuadas del Seminario-Taller: “Arquitectura Sostenible” Un enfoque sobre estrategias de diseño bioclimático: Caso Ecuador. *Estoa. Revista de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca*, *5*(9), 151-172. https://doi.org/10.18537/est.v005.n009.11

ARCONEL. (2024). *Regulación Nro. ARCONEL-005/24: Marco normativo de la generación distribuida para el autoabastecimiento de consumidores regulados de energía eléctrica*. https://arconel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/10/Regulacion-005_24-Codificada-signed-1.pdf

Arduin, D., Caldas, L. R., Paiva, R. de L. M., & Rocha, F. (2022). Life Cycle Assessment (LCA) in Earth Construction: A Systematic Literature Review Considering Five Construction Techniques. *Sustainability*, *14*(20), 1-30.

Asdrubali, F., Colladon, A. F., Segneri, L., & Gandola, D. M. (2024, agosto 23). *El análisis del ciclo de vida (ACV) y la eficiencia energética en los edificios: Un repaso a más de veinte años de investigación*. arXiv.Org. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114684

Boeing, G., Higgs, C., Liu, S., Giles-Corti, B., Sallis, J. F., Cerin, E., Lowe, M., Adlakha, D., Hinckson, E., Moudon, A. V., Salvo, D., Adams, M. A., Barrozo, L. V., Bozovic, T., Delclòs-Alió, X., Dygrýn, J., Ferguson, S., Gebel, K., Ho, T. P., … Arundel, J. (2022). Uso de datos abiertos y software de código abierto para desarrollar indicadores espaciales de diseño urbano y características del transporte con el fin de lograr ciudades saludables y sostenibles. *The Lancet Global Health*, *10*(6), e907-e918. https://doi.org/10.1016/S2214-109X(22)00072-9

Briz de Felipe, T., & de Felipe Boente, I. (2017). Un enfoque metodológico para áreas verdes urbanas: Un caso de estudio en Madrid. *Revista Chapingo serie ciencias*

forestales y del ambiente, *23*(2), 315-328. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2016.03.012

Butcher, M. (2025). *ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION*. https://www.sustainableconcrete.org.uk/Sustainable/media/Sustainable/Publications/EPD_HUB-1652_2025-03-03_1.pdf

Cabrera, S., González, A., & Mingolla, G. (2021). *CONSTRUCCIONES SOSTENIBLES CON TIERRA. ANÁLISIS DEL BLOQUE DE TIERRA COMPRIMIDA (BTC)*. https://eventos.antac.org.br/index.php/euroelecs/article/download/2522/2331

Cabrera, S. P., Aranda-Jiménez, Y. G., Suárez-Domínguez, E. J., & Rotondaro, R. (2020). Bloques de Tierra Comprimida (BTC) estabilizados con cal y cemento. Evaluación de su impacto ambiental y su resistencia a compresión. *Revista Hábitat Sustentable*, 70-81. https://doi.org/10.22320/07190700.2020.10.02.05

Cal Mouriño, A. (2017). *El ciclo de vida de la madera en la construcción: Análisis de un caso práctico*. http://hdl.handle.net/2183/19570

Camacho Ochoa, A. J. (2021). *Análisis comparativo del ciclo de vida de ladrillos cocidos vs ladrillos suelo cemento* [bachelorThesis]. http://dspace.utpl.edu.ec/handle/20.500.11962/28492

Camacho Sandoval, T., Magaña Rueda, V. O., Ramos de Robles, S. L., & Gran Castro, J. A. (2024). La vegetación como reguladora del clima urbano: El caso del Área Metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México. *Investigaciones geográficas*, (114). https://doi.org/10.14350/rig.60849

Cardoso, M. A. (2020). MATERIALES Y SISTEMAS DE CONSTRUCCION CON TIERRA CRUDA EN EL AMBITO DE LA SUSTENTABILIDAD. *Construcción con Tierra*, 53-64.

Carvalho, B. T., Alberto, E., & Silvoso, M. M. (2023). AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DE SISTEMAS DE ALVENARIA DE BLOCOS DE SOLO-CIMENTO COM DIFERENTES DOSAGENS. *Encontro Latino-americano e Europeu sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis (euroELECS)*, *4*, 250-265.

Casillas Zapata, A. M. (2023). Desigualdad en la dotación de áreas verdes en el municipio de Monterrey: Una injusticia ambiental. *Región y sociedad*, *35*. https://doi.org/10.22198/rys2023/35/1784

Castro, M. I. R., Mendoza, I. C. O., Pilay, M. A. T., Sornoza-Parrales, D., & Pisco, D. G. V. (2026). Economic Feasibility of Residential Photovoltaic Systems in Manabí Province, Ecuador: Comparative Analysis of Capacities. *Salud, Ciencia y Tecnología*, *6*, 2565-2565. https://doi.org/10.56294/saludcyt20262565

CEPAL. (2023). *"Transformación del hábitat y las ciudades: Hacia un desarrollo urbano sostenible en América Latina y el Caribe. Intervenciones en la XXXI Asamblea General del Foro de Ministros y Autoridades Máximas de la Vivienda y el Urbanismo de América Latina y el Caribe (MINURVI)", serie Seminarios y Conferencias, N° 104 (LC/TS.2023/133)*.

CEPAL, ONU HABITAT, & MINURVI. (2016). *Desafíos, dilemas y compromisos de una agenda urbana común*. https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/3edf45dd-221f-4f29-959c-3aeadec03cfc/content

Chabla-Auqui, L., Ochoa-Correa, D., Villa-Ávila, E., & Astudillo-Salinas, P. (2023). Distributed Generation Applied to Residential Self-Supply in South America in the Decade 2013–2023: A Literature Review. *Energies*, *16*(17), 6207. https://doi.org/10.3390/en16176207

Comisión Europea. (2025). *Sistema de Información Geográfica sobre Energía Fotovoltaica (PVGIS) del CCI*. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/

Contreras Escandón, C. H. (2017). Superar la sostenibilidad urbana: Una ruta para América Latina. *Bitácora Urbano Territorial*, *27*(2), 27-34. https://doi.org/10.15446/bitacora.v27n2.62483

Crawford, R., & Hall, M. (2020). *Embodied energy | YourHome*. https://www.yourhome.gov.au/materials/embodied-energy

Cuce, P. M., Cuce, E., & Santamouris, M. (2025). Towards Sustainable and Climate-

Resilient Cities: Mitigating Urban Heat Islands Through Green Infrastructure. *Sustainability*, *17*(3), 1303. https://doi.org/10.3390/su17031303

Cuevas Acuña, G., Ayala Moreno, J. P., Esquer Peralta, J., Munguia Vega, N. E., Alvarado Ibarra, J., Cuevas Acuña, G., Ayala Moreno, J. P., Esquer Peralta, J., Munguia Vega, N. E., & Alvarado Ibarra, J. (2024). Desempeño térmico de prototipo de techo verde bajo condiciones de calor extremo. *Entreciencias: diálogos en la sociedad del conocimiento*, *12*(26). https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2024.26.89127

Dabaieh, M., Heinonen, J., El-Mahdy, D., & Hassan, D. M. (2020). A comparative study of life cycle carbon emissions and embodied energy between sun-dried bricks and fired clay bricks. *Journal of Cleaner Production*, *275*, 122998. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122998

De Cristo, E., Evangelisti, L., Barbaro, L., De Lieto Vollaro, R., & Asdrubali, F. (2025). A Systematic Review of Green Roofs' Thermal and Energy Performance in the Mediterranean Region. *Energies*, *18*(10), 2517. https://doi.org/10.3390/en18102517

Enríquez, L. A. E.-, Maza, J. E. M.-, & Amaya-Márquez, P. S. (2024). Cambios en la superficie del área verde urbana en la ciudad de Machala, periodo 1991–2023: Una propuesta para un modelo de desarrollo urbano sostenible. *Green World Journal*, *7*(02). https://doi.org/10.53313/gwj72163

Environment, U. N. (2025, junio 3). *Informe sobre la situación mundial de los edificios y la construcción 2024/2025*. https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-buildings-and-construction-20242025

EPA. (2019, abril 4). *Las islas de calor* [Policies and Guidance]. https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/las-islas-de-calor

Flores-Asin, J. E., Martinez, C. F., Cantón, M. A., & Correa, E. N. (2016). Desempeño térmico de cubiertas vegetadas en ciudades de zonas áridas. *Revista Hábitat Sustentable*, 6-15.

Genera tu energía. (2026). Instalación de Sistemas Solares Trifásicos Residenciales: Equipos On/Off Grid o Híbridos (12 a 18 Paneles). *Genera Tu Energía*.

https://generatuenergia.net/producto/instalacion-de-sistemas-solares-trifasicos-residenciales-equipos-on-off-grid-o-hibridos-12-a-18-paneles-copia/

Hernández, A., Paredes, J., Miranda, S., Arguello, C., Villacis, J., Salazar, E., Noboa, V., & Sánchez, R. (2025). *An Analysis of the Urban Green Space Index in Ecuadorian Cities Through Mathematical Modeling: A Territorial Analysis*. https://www.mdpi.com/2413-8851/9/6/232

IEA. (2024). *Resumen ejecutivo – Baterías y transiciones energéticas seguras – Análisis*. IEA. https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions/executive-summary

IEA. (2026). *Buildings—Energy System*. IEA. https://www.iea.org/energy-system/buildings

INEC. (2012a). *Indice Verde Urbano*. Instituto Nacional de Estadística y Censos. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/indice-verde-urbano/

INEC. (2012b). *Solo el 5% de ciudades cumplen con la normativa internacional del Índice Verde Urbano*. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Sitios/sitio_verde/boletin.pdf

INEC. (2022). *Resultados*. Censo Ecuador. https://www.censoecuador.gob.ec/resultados-censo/

IPCC. (2022). *Capítulo 8: Sistemas urbanos y otros asentamientos*. Grupo de Trabajo III: Mitigación del cambio climático. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/chapter/chapter-8/

IRENA. (2024, septiembre 24). *Costes de la generación de energía renovable en 2023*. https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023

ISO. (2006a). *ISO 14040:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*. ISO. https://www.iso.org/standard/37456.html

ISO. (2006b). *ISO 14044:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines*. ISO. https://www.iso.org/standard/38498.html

ISO. (2018). *ISO 14067:2018 Greenhouse gases—Carbon footprint of products—*

Requirements and guidelines for quantification. ISO. https://www.iso.org/standard/71206.html

ISO. (2020). *ISO 14040:2006/Amd 1:2020*. ISO. https://www.iso.org/standard/76121.html

KoryTech. (2026). Inversor de voltaje SUG con potencia de 3000W 12V Onda Pura. *KoryTech*. https://korytech.com.ec/producto/inversor-de-voltaje-sug-sgpc-3000-onda-pura-3000w-12vdc-a-120v-1-toma/

Lata, J., Parra, P., & Ampuño, G. (2025). *Energy Evaluation of Photovoltaic Integration in Student Building with Different PV Technologies—Universidad Politécnica Salesiana*. https://pure.ups.edu.ec/es/publications/energy-evaluation-of-photovoltaic-integration-in-student-building/

Lützkendorf, T., & Balouktsi, M. (2022). Embodied carbon emissions in buildings: Explanations, interpretations, recommendations. *Buildings & Cities*, *3*(1). https://doi.org/10.5334/bc.257

Minunno, R., O'Grady, T., Morrison, G. M., & Gruner, R. L. (2021). Investigating the embodied energy and carbon of buildings: A systematic literature review and meta-analysis of life cycle assessments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *143*, 110935. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110935

MIVISOL. (2026). *Panel solar 150W policristalino*. Casasolar. https://www.mivisol.com/product-page/simax-140w-policristalino

Muñoz, C., Zaror, C., Saelzer, G., & Cuchí, A. (2012). Estudio del flujo energético en el ciclo de vida de una vivienda y su implicancia en las emisiones de gases de efecto invernadero, durante la fase de construcción Caso Estudio: Vivienda Tipología Social. Región del Biobío, Chile. *Revista de la construcción*, *11*(3), 125-145. https://doi.org/10.4067/S0718-915X2012000300011

NASA. (2026). *NASA POWER | Data Access Viewer (DAV)*. https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/

Necula, M., Andrei, T., Oancea, B., & Păun, M. (2024, febrero 28). *Estimación del Índice de Espacio Verde Urbano a partir de datos recopilados mediante teledetección para*

ciudades rumanas. arXiv.Org. https://arxiv.org/abs/2402.18618v1

Nouri, H., Safehian, M., & Mir Mohammad Hosseini, S. M. (2023). Life cycle assessment of earthen materials for low-cost housing a comparison between rammed earth and fired clay bricks. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, *41*(2), 364-377. https://doi.org/10.1108/IJBPA-02-2021-0021

Núñez, J. M. (2021). Análisis espacial de las áreas verdes urbanas de la Ciudad de México. *Economía Sociedad y Territorio*, 803-833. https://doi.org/10.22136/est20211661

Ochoa, Y., & Ojeda, L. (2017). Conservación de vegetación para reducir riesgos hidrometereológicos en una metrópoli fronteriza. *Scielo*. https://www.scielo.org.mx/pdf/estfro/v18n35/2395-9134-estfro-18-35-00047.pdf

Ollivier-Fierro, J. Ó., Robles-Villa, J., Flores-García, M. A., Ollivier-Fierro, J. Ó., Robles-Villa, J., & Flores-García, M. A. (2024). La innovación disruptiva de la generación de electricidad distribuida: Un reto para la administración pública en México. *PAAKAT: revista de tecnología y sociedad*, *14*(26). https://doi.org/10.32870/pk.a14n26.852

ONU-HABITAT. (s. f.). *Planificación y diseño | UN-Habitat*. Recuperado 11 de julio de 2026, de https://unhabitat.org/es/node/4723

Ortiz-Castellanos, E., Cristancho-Fernández, D., & Avellaneda, B. (2020). Análisis comparativo del desempeño de los ladrillos tradicionales frente a ladrillos pet. *Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, *11*(1), 54-64. https://doi.org/10.25213/2216-1872.36

Pešta, J., Pavlů, T., Fořtová, K., & Kočí, V. (2020). Sustainable Masonry Made from Recycled Aggregates: LCA Case Study. *Sustainability*, *12*(4), 1581. https://doi.org/10.3390/su12041581

Prien, M. (2024). LIFE CYCLE ASSESSMENT OF BRICKS CONTAINING PLASTIC WASTE IN THE NORTHERN PART OF GERMANY. *Open Access Master's Theses*. https://doi.org/10.23860/thesis-2525

PROVIENTO. (2026). *Inversor ONGRID 2kW GROWATT MIC 2000TL-X (WIFI)*. PROVIENTO STORE. https://proviento.com.ec/inversores/256-inversor-ongrid-2kw-

growatt-mic-2000tl-x-wifi.html

Pulla, E., & Rodríguez, B. (2021). Análisis del índice verde urbano y crecimiento de la ciudad de Machala en los periodos 2000–2018. *Revista Científica Agroecosistemas*. https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/468

QGIS. (2026). *QGIS resources · QGIS*. https://www.qgis.org/resources/hub/

Rivero Camacho, C., Ferreira Sánchez, A., Rivero Camacho, C., & Ferreira Sánchez, A. (2021). APLICACIÓN DE LA “FOOTPRINT FAMILY” PARA LA EVALUACION AMBIENTAL DE EDIFICIOS PUBLICOS EN ESPAÑA. ESTUDIO DE CASO: CENTRO EDUCATIVO. *Revista hábitat sustentable*, *11*(1), 72-85. https://doi.org/10.22320/07190700.2021.11.01.06

Rodríguez, S., Martínez, O., & González, C. (2021). *Evaluación por simulación dinámica del comportamiento térmico en una casa interés social con la incorporación de estrategias de arquitectura bioclimática en Guanajuato, México*. https://doi.org/https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2021.22.1.004

Shao, J., Yao, W., Luo, L., Zeng, L., He, Z., Wang, P., & Guo, H. (2024, abril 21). *Una perspectiva de desarrollo sostenible sobre las prioridades y los beneficios de la vegetación en los tejados a escala urbana*. arXiv.Org. https://arxiv.org/abs/2404.13692v1

SOLPHOWER. (2026). *Batería Gel 200ah 12v*. Solphower Ecuador. https://solphower.com/es/productos/solphower-ecuador-bateria-gel-200ah-12v

Stenberg, E., Hernández, J., & Huuhka, S. (2023). *Https://www.scielo.cl/pdf/arq/n112/0717-6996-arq-112-84.pdf*. https://www.scielo.cl/pdf/arq/n112/0717-6996-arq-112-84.pdf

Tapia, M., Ramos, L., Heinemann, D., & Zondervan, E. (2022). Power to the city: Assessing the rooftop solar photovoltaic potential in multiple cities of Ecuador. En *Process Systems Engineering: For a Smooth Energy Transition* (pp. 383-417). Walter de Gruyter. https://doi.org/10.1515/9783110705201-014

Taylor, C., Roy, K., Dani, A. A., Lim, J. B. P., De Silva, K., & Jones, M. (2023). Delivering Sustainable Housing through Material Choice. *Sustainability*, *15*(4), 3331.

https://doi.org/10.3390/su15043331

US EPA. (2026). *Using Green Roofs to Reduce Heat Islands* [Overviews and Factsheets]. https://www.epa.gov/heatislands/using-green-roofs-reduce-heat-islands

Vélez-Torres, G., Alvarado-Palacios, K., & Peñafiel, A. G. (2025). Análisis de Ciclo de Vida de materiales usados en viviendas sociales en Ecuador. *Maskana*, *16*(1), 307-319. https://doi.org/10.18537/mskn.16.01.19

Venegas Tomalá, A. O. (2018). *Evaluación de la energía contenida, emisiones de CO2 y material particulado en la fabricación del ladrillo semi-mecanizado tochano en Cuenca, a través del análisis de ciclo de vida (ACV).* http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/29319

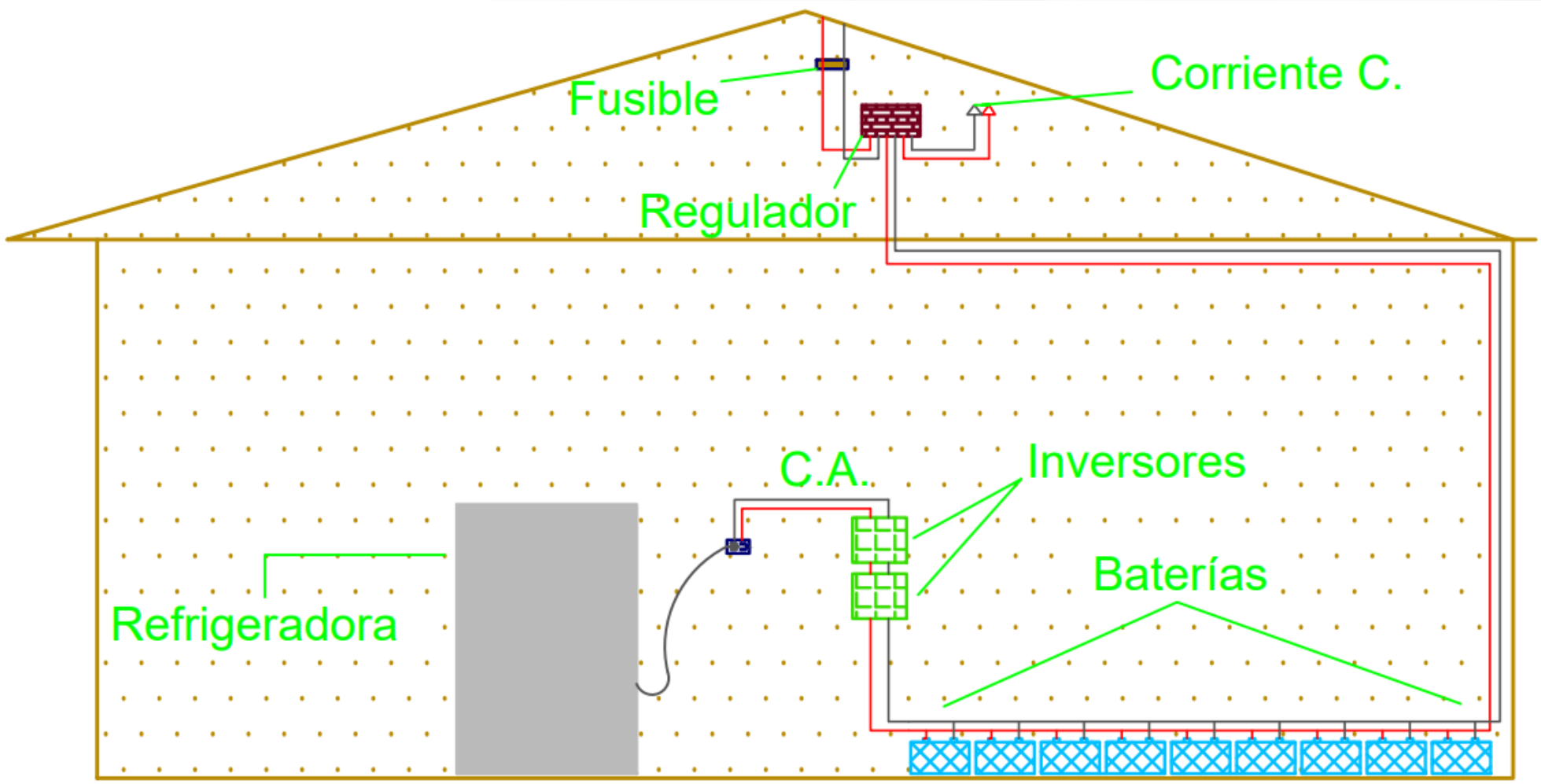
Wang, W., Yang, H., & Xiang, C. (2023). Green roofs and facades with integrated photovoltaic system for zero energy eco-friendly building: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *60*. https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103426

Yadav, K., Singh, A., Bhat, O. N., & Sharma, R. L. (2024). Transforming waste into innovation: A review of plastic bricks as sustainable construction materials. *Discover Civil Engineering*, *1*(1), 38. https://doi.org/10.1007/s44290-024-00040-8

Zalamea León, E., Cuevas Barraza, C., Zalamea León, E., & Cuevas Barraza, C. (2019). Adaptabilidad de paneles solares fotovoltaicos mono y policristalinos en techumbres de viviendas de emprendimientos inmobiliarios. *Revista de la construcción*, *18*(1), 42-53. https://doi.org/10.7764/rdlc.1.1.42

Apéndice A

Imagen referencial: Diagrama eléctrico del resto de componentes del sistema fotovoltaico autónomo



Nota. Corriente alterna a la refrigeradora como ejemplo de las cargas.