

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Evaluación de sostenibilidad entre bahareque y concreto armado para construcción de viviendas de interés social.

Proyecto de Titulación

Previo la obtención del Título de:

Magíster en Ciencias de la Tierra

Presentado por:

Alid Katherine Rocha Tamayo

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

A mis padres Alid y Luis, y a mis hermanas Estefanía y Jessica, por ser siempre mi mayor apoyo y motivación en cada uno de mis proyectos de vida.

Al resto de mi familia, por creer en mí y brindarme su ayuda incondicional.

Y a todas las personas que conocí en este camino: maestros, compañeros y cada persona que dejó su huella para el cumplimiento de esta meta.

Agradecimientos

A mis tutores de conocimiento, la PhD. Natividad García, la PhD. Irene Josa y el PhD. Albert de la Fuente, por su valiosa orientación y aportes que hicieron posible la culminación de esta etapa académica.

De igual manera, agradezco profundamente a mis familiares y amigos, quienes me brindaron su apoyo incondicional durante todo este recorrido.

Finalmente, se hace constar que para la redacción y organización de partes de este documento se emplearon herramientas de Inteligencia Artificial, utilizadas únicamente como apoyo en la redacción.

Declaración Expresa

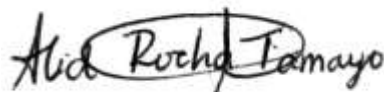
Yo, Alid Katherine Rocha Tamayo acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 29 de agosto del 2025.



Alid Rocha Tamayo

Evaluadores

MSc. Carlos Quishpe

Evaluador

PhD. Natividad García

Tutor de proyecto

Resumen

El déficit habitacional genera múltiples problemas sociales y plantea la necesidad de soluciones habitacionales accesibles para sectores vulnerables. Por ello, el presente proyecto tiene como objetivo evaluar comparativamente dos sistemas estructurales, bahareque y concreto armado, mediante un modelo multicriterio que permita determinar su aplicabilidad en viviendas de interés social en Ecuador. Se plantea como hipótesis que el bahareque puede representar una opción más sostenible. Para justificar dicha evaluación, se consideran criterios económicos, ambientales y sociales. En el desarrollo del estudio se utilizó el método MIVES (Modelo Integrado de Valor para una Evaluación Sostenible), apoyado en un árbol de decisión construido con base en estudios previos y encuestas a expertos. Se definieron indicadores y criterios de sostenibilidad, y se establecieron las alternativas estructurales con su configuración y diseño. En el aspecto económico se evaluaron costos de materiales y construcción; el ambiental incluyó consumo de recursos, energía y emisiones; y el social consideró condiciones laborales y molestias locales. Los resultados demostraron que el sistema de bahareque obtuvo mejores índices de sostenibilidad en los tres requisitos analizados. Se concluye que este modelo de evaluación puede ser replicado en distintos contextos ajustando sus componentes según los intereses de los involucrados.

Palabras Clave: sostenibilidad, evaluación multicriterio, construcción alternativa, análisis comparativo.

Abstract

The housing deficit generates multiple social problems and raises the need for affordable housing solutions for vulnerable sectors. Therefore, the objective of this project is to comparatively evaluate two structural systems, bahareque and reinforced concrete, using a multi-criteria model to determine their applicability in low-income housing in Ecuador. It is hypothesized that bahareque may represent a more sustainable option. To justify this evaluation, economic, environmental and social criteria are considered. In the development of the study, the MIVES method (Integrated Value Model for Sustainable Evaluation) was used, supported by a decision tree built based on previous studies and expert surveys. Sustainability indicators and criteria were defined, and the structural alternatives with their configuration and design were established. In the economic aspect, material and construction costs were evaluated; the environmental aspect included resource consumption, energy and emissions; and the social aspect considered labor conditions and local nuisances. The results showed that the bahareque system obtained better sustainability indexes in the three requirements analyzed. It is concluded that this evaluation model can be replicated in different contexts by adjusting its components according to the interests of those involved.

Keywords: sustainability, multi-criteria evaluation, alternative construction, comparative analysis.

Índice general

Resumen	I
<i>Abstract</i>	II
Índice general	III
Abreviaturas	V
Simbología	VI
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	VII
Capítulo 1	1
1. Introducción	2
1.1 Descripción del Problema	3
1.2 Justificación del Problema	4
1.3 Objetivos	5
<i>1.3.1 Objetivo general</i>	5
<i>1.3.2 Objetivos específicos</i>	5
1.4 Marco teórico	5
1.4.1 Déficit habitacional en Ecuador	5
1.4.2 Vivienda de interés social y sostenibilidad	6
1.4.3 Enfoques de la construcción sostenible	8
1.4.4 Sistema constructivo de bahareque	9
1.4.5 Sistema estructural de concreto armado	10
1.4.6 Evaluación de sostenibilidad en la construcción	11
1.4.7 Modelo MIVES: evaluación integral de sostenibilidad	12
Capítulo 2	13
2. Metodología.	14
2.1 Descripción de MIVES	14

2.2 Métodos de Construcción	15
2.3 Modelo de decisión	17
2.3.1 Requerimientos económicos	19
2.3.2 Requerimientos ambientales	20
2.3.3 Requerimientos sociales	22
2.4 Parámetros de funciones de valor	22
2.5 Cuantificación de indicadores.....	23
2.6 Análisis de sensibilidad	24
Capítulo 3	25
3. Resultados y análisis	26
3.1 Resultados de índice de sostenibilidad global.....	26
3.2 Resultados del análisis de sensibilidad.....	29
3.3 Discusión de resultados	30
Capítulo 4.....	33
4.1 Conclusiones y recomendaciones.....	34
4.1.1 Conclusiones.....	34
4.1.2 Recomendaciones.....	35
Referencias	38
Apéndice A.....	44
Apéndice B.....	45

Abreviaturas

ACI	American Concrete Institute
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
CRA	reed-reinforced adobe
DL	Función decreciente lineal
DS	Función decreciente en forma de S
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
IS	Índice de Sostenibilidad
LC	Función lineal creciente
MIVES	Modelo Integrado de Valor para una Evaluación Sostenible
NEC	Norma Ecuatoriana de la Construcción
ODS	Objetivo de Desarrollo Sostenible
UN	United Nations

Simbología

CO ₂	Dióxido de carbono
kgCO ₂ e	Kilogramo de dióxido de carbono equivalente
m	Metro
m ²	Metro cuadrado

Índice de figuras

Figura 1 <i>Esquema metodológico: Modelo Integrado de Valor para la Evaluación Sostenible (MIVES)</i>	14
Figura 2 <i>Modelo analítico de cada alternativa: a) Bahareque y b) Concreto armado (Rocha-Tamayo et al., 2025)</i>	17
Figura 3 <i>Árbol de decisión para vivienda de interés social</i>	19
Figura 4 <i>Resultados de índice de sostenibilidad con la contribución de cada indicador (Rocha-Tamayo et al., 2025)</i>	26
Figura 5 <i>Comparación de las emisiones de carbono de ambos sistemas estructurales (Rocha-Tamayo et al., 2025)</i>	28
Figura 6 <i>Resultados de análisis de sensibilidad (Rocha-Tamayo et al., 2025)</i>	30

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Parámetros definidos para las funciones de valor de cada indicador</i>	23
Tabla 2 <i>Datos para evaluación de sostenibilidad</i>	24

Capítulo 1

1. Introducción

Actualmente, con una población mundial que se acerca a los 8000 millones de personas, uno de los principales desafíos para los gobiernos es garantizar el acceso a una vivienda adecuada, tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo (UNFPA, 2023). La vivienda constituye una necesidad básica para la salud y el bienestar humano; su carencia puede generar efectos negativos como problemas de salud física y mental, mayor exposición a enfermedades, incremento en visitas hospitalarias, trastornos relacionados con el consumo de sustancias e inestabilidad en los ingresos (Ramage et al., 2021). Según datos de la ONU en 2023, aproximadamente 1100 millones de personas habitan en viviendas inadecuadas y cerca de 2000 millones en asentamientos informales (United Nations, 2023), situación que dificulta el cumplimiento del ODS 11, centrado en lograr comunidades sostenibles, así como del ODS 12, orientado a garantizar patrones responsables de producción y consumo (Naciones Unidas, 2024).

En este contexto, la construcción de viviendas de interés social se plantea como una estrategia fundamental para mejorar las condiciones de vida y fomentar la equidad. Sin embargo, estas soluciones habitacionales han sido priorizadas históricamente por su bajo costo inicial, sin considerar aspectos esenciales como la calidad y el confort (Couret & Párraga, 2019). Además, su diseño debe atender criterios de sostenibilidad ambiental, económica y social, debido al creciente impacto de la construcción en el uso de recursos, emisiones de carbono y consumo energético.

El uso de materiales locales en regiones con baja industrialización representa una alternativa viable, tanto económica como ambientalmente. En América Latina, materiales como la piedra, tierra, bambú o caña guadua ofrecen soluciones creativas, sostenibles y adaptadas al entorno (Ghisleni, 2024). En países como Argentina, Colombia y Perú se han implementado políticas que promueven el uso de materiales reciclados y técnicas constructivas tradicionales o mejoradas (Ministerio de interior Obras Públicas y Vivienda, 2019; Pérez Godoy, 2022). En Ecuador, el uso

de caña guadua ha demostrado buenos resultados en comportamiento sísmico y reducción de impacto ambiental estructural (Tello-Ayala et al., 2023). El bahareque, sistema constructivo tradicional a base de caña, barro y madera, se presenta como una opción viable para viviendas de interés social por su bajo costo, sostenibilidad y adaptabilidad al entorno rural y urbano.

En contraposición, el concreto armado continúa siendo el sistema estructural más empleado por su durabilidad y estandarización técnica. No obstante, su producción implica un alto consumo energético y elevadas emisiones de CO₂, lo que plantea cuestionamientos sobre su sostenibilidad a largo plazo (Xi et al., 2023).

En Ecuador, el déficit habitacional supera los 2,7 millones de viviendas, de las cuales más del 75% requieren mantenimiento y el resto reconstrucción completa. El MIDUVI ha identificado más de 325 mil ciudadanos interesados en acceder a viviendas de interés social, lo que resalta la necesidad de evaluar soluciones estructurales que sean sostenibles, eficientes y asequibles (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2021).

Ante esta problemática, surge la necesidad de comparar alternativas constructivas como el bahareque y el concreto armado mediante metodologías objetivas. Este estudio propone el uso del modelo MIVES para evaluar, bajo criterios económicos, sociales y ambientales, cuál de estos sistemas resulta más adecuado para proyectos de vivienda de interés social en Ecuador.

1.1 Descripción del Problema

En la actualidad, uno de los principales desafíos en la construcción de viviendas unifamiliares es implementar soluciones estructurales sostenibles que consideren materiales naturales como la caña guadua. Este recurso presenta múltiples cualidades relevantes: rápido crecimiento, peso ligero y elevada resistencia estructural. Se ha demostrado que la caña guadua puede usarse eficientemente en proyectos arquitectónicos que demandan grandes luces, con buen comportamiento ante fuerzas de compresión. Además, promueve construcciones de bajo impacto

ambiental, ya que los sistemas constructivos que la integran pueden generar un ahorro ambiental de hasta el 60% frente a métodos convencionales (Eleftheriou et al., 2022).

Por otro lado, los sistemas tradicionales como el concreto armado evidencian un alto impacto ambiental, especialmente por el uso del acero de refuerzo, el cual representa entre el 24% y 37% del total de emisiones generadas (Escamilla et al., 2018). A pesar de las ventajas del bahareque, que combina la caña guadua con materiales locales, su aplicación aún es limitada. Según un estudio exploratorio del mercado de caña guadua en Ecuador, mientras no se desarrollen alternativas más elaboradas que incentiven su uso en vivienda, industria o manufactura, el país seguirá dependiendo de materiales convencionales (USAID, 2005).

Además, se requiere generar datos locales válidos sobre la producción de caña guadua que puedan ser integrados en bases de datos de análisis de ciclo de vida (ACV), facilitando así su validación internacional (Edwin et al., 2014).

El déficit habitacional en Ecuador agrava el contexto, con 325.411 ciudadanos interesados en adquirir viviendas de interés social, de los cuales el 80.6% priorizan soluciones económicas (Torres, 2021). En este escenario, es necesario evaluar alternativas constructivas viables y sostenibles.

1.2 Justificación del Problema

Frente al déficit habitacional y al alto impacto ambiental de los materiales tradicionales, se vuelve prioritario identificar opciones estructurales que contribuyan al desarrollo de viviendas económicas, funcionales y sostenibles. El bahareque, al integrar la caña guadua como material renovable, representa una alternativa potencialmente viable. Esta investigación busca analizar su desempeño ambiental mediante un análisis de ciclo de vida (ACV), con el fin de sustentar su aplicación en viviendas de interés social. Así, se pretende promover soluciones constructivas con

menor huella de carbono y fomentar el uso de materiales locales y sostenibles dentro del sector habitacional ecuatoriano.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar comparativamente la sostenibilidad de los sistemas estructurales de bahareque y concreto armado para su aplicación en viviendas de interés social en Ecuador, mediante la metodología MIVES, con el fin de identificar la alternativa más viable desde los ámbitos económico, ambiental y social.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Diseñar los modelos estructurales de bahareque y concreto armado para una vivienda unifamiliar tipo, cumpliendo con las normativas técnicas vigentes en Ecuador.
2. Determinar los indicadores económicos, ambientales y sociales relevantes para la evaluación de sostenibilidad, a partir de literatura técnica y encuestas a expertos.
3. Aplicar el modelo MIVES para cuantificar el índice de sostenibilidad de cada sistema estructural, mediante funciones de valor y árbol de decisión.
4. Comparar los resultados obtenidos para ambos sistemas, analizando su desempeño bajo distintos escenarios mediante un análisis de sensibilidad.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Déficit habitacional en Ecuador

La problemática del déficit habitacional en Ecuador es multidimensional (HEXAGON CONSULTORES, 2008). No se trata únicamente de la falta de viviendas nuevas, sino también de la precariedad de las existentes, la falta de servicios básicos, y la imposibilidad de mantenimiento por parte de las familias (Gonçalves Almeida et al., 2015). Según datos recientes, un alto

porcentaje de hogares requieren intervención urgente, lo que demanda alternativas constructivas escalables, seguras y de bajo costo (Gonçalves Almeida et al., 2015; HEXAGON CONSULTORES, 2008).

El déficit habitacional en Ecuador es un problema que persiste a lo largo de los años afectando a la mayoría de los habitantes. Según el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), el Instituto de Estadísticas y Censo y la Encuesta Nacional de Empleo, Desempleo y Subempleo (EMENDU), se obtuvo un déficit total de 2'744.125 de viviendas, de las cuales el 24.3% en viviendas que requieren reconstruirse en su totalidad y el resto requieren mantenimiento. Además, entre las viviendas recuperables, el 66.15% se encuentra en el sector urbano y el 33.85% en el sector rural (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2021). En respuesta a estos desafíos, el MIDUVI ha establecido varias estrategias con el fin de reducir el déficit habitacional, tales como brindar viviendas de interés social subsidiadas en su totalidad por parte del gobierno, el mantenimiento y readecuación de viviendas afectadas por emergencias de todo tipo, entre otras (MIDUVI, 2024).

El contexto ecuatoriano presenta una oportunidad estratégica para el desarrollo de viviendas sostenibles mediante técnicas adaptadas al entorno. Las políticas públicas deben contemplar modelos que integren a pequeños productores, mano de obra local y materiales renovables como la caña guadua, promoviendo un enfoque de economía circular en el sector habitacional (Torres Álava et al., 2022).

1.4.2 Vivienda de interés social y sostenibilidad

La vivienda social ha sido reconocida como una herramienta clave en la reducción de desigualdades urbanas y en la consolidación de entornos dignos, seguros y saludables para sectores vulnerables (Ramage et al., 2021). Sin embargo, muchos proyectos de este tipo priorizan el bajo costo de construcción por encima de la calidad, la durabilidad o el impacto ambiental (Naciones

Unidas, 2024). Las agendas internacionales, como la Nueva Agenda Urbana de ONU-Hábitat, refuerzan la idea de que las viviendas sociales deben responder también a los desafíos del cambio climático, la resiliencia estructural y la eficiencia energética (Amirtahmasebi et al., 2020). Por ello, en los últimos años ha cobrado relevancia la necesidad de integrar criterios de sostenibilidad en el diseño y construcción de estas viviendas (Ponce, 2025).

En este sentido, el objetivo de desarrollo sostenible 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles, cobra una relevancia central. Este ODS propone lograr que las ciudades sean inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles, con metas específicas que promueven el acceso universal a viviendas adecuadas y asequibles, la mejora de barrios marginales, la planificación urbana participativa y la reducción del impacto ambiental per cápita de las urbes. La investigación sobre sistemas constructivos sostenibles para vivienda social, como el bahareque, responde directamente a estos desafíos al proponer soluciones estructurales de bajo impacto ambiental, adaptadas a las condiciones locales, con materiales accesibles y renovables (United Nations, 2023). Así, se busca no solo satisfacer la necesidad habitacional, sino también contribuir activamente al cumplimiento del ODS 11 desde una perspectiva técnica y contextual.

Además, la construcción sostenible de viviendas sociales también se vincula con el objetivo de desarrollo sostenible 12: Producción y Consumo Responsables, que busca garantizar el uso eficiente de los recursos naturales y la adopción de prácticas industriales que minimicen el impacto ambiental. Este objetivo promueve, entre otras acciones, la reducción de desechos y emisiones, el diseño de productos con menor huella ecológica y la implementación de procesos circulares en sectores como el de la construcción (United Nations, 2023). En este contexto, evaluar estructuralmente alternativas como el bahareque frente al concreto armado permite identificar soluciones que empleen materiales renovables, de bajo impacto ambiental y adaptados a las

realidades locales. Esto contribuye directamente a reducir la presión sobre los recursos no renovables y a fomentar prácticas constructivas sostenibles a escala regional.

El diseño de viviendas sociales sostenibles implica integrar aspectos ambientales, sociales y económicos desde la fase de planificación (Ordóñez Díaz & Meneses Silva, 2015). La promoción de soluciones resilientes frente a riesgos naturales, el uso racional de recursos, y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero se convierten en elementos claves dentro del proceso constructivo (Gifreu, 2018). La sostenibilidad en este sector también busca fomentar comunidades integradas y asequibles, a través del fortalecimiento de dinámicas económicas locales y la reducción de desigualdades en el acceso a recursos urbanos (Paucar, 2024.)

1.4.3 Enfoques de la construcción sostenible

La construcción sostenible se define como aquella que minimiza el impacto ambiental durante todo el ciclo de vida de una estructura, desde la extracción de materiales hasta la demolición o reutilización (Avendaño Castro et al., 2021). Entre sus principios se incluyen el ahorro energético, la eficiencia en el uso del agua, la selección responsable de materiales, el confort térmico y acústico, y la gestión eficiente de residuos. Estos criterios, adaptados al contexto local, permiten optimizar los recursos y reducir las externalidades negativas de la urbanización acelerada (Hussain & Kamal, 2015; Zajemska et al., 2025).

En América Latina, la construcción de viviendas ha evolucionado con la adopción de sistemas industrializados que utilizan paredes delgadas de hormigón armado y encofrados metálicos reutilizables para reducir los costes de material y mano de obra (Castillo et al., 2024). Sin embargo, a pesar de su resistencia y durabilidad, el hormigón sigue siendo un material con una alta huella ambiental, debido a la extracción de materias primas, el consumo de energía en su producción y las emisiones de carbono generadas en su transporte. Por el contrario, alternativas como el bahareque han demostrado ser más sostenibles y accesibles al utilizar materiales locales

como la caña de Guadua, reduciendo costes y minimizando el impacto ambiental. Algunos estudios han explorado el uso de materiales innovadores como fibras de palma aceitera en vigas de hormigón armado (Momoh et al., 2024), mampostería de arcilla hueca aislada o muros de hormigón de poliestireno extruido (Mahlan et al., 2024), pero siguen presentando retos en términos de viabilidad económica y accesibilidad para las comunidades de bajos ingresos.

Estudios como el de Eleftheriou (2022) han demostrado que el uso de muros mixtos de caña guadua y cemento puede generar ahorros ambientales de hasta un 60% en comparación con sistemas constructivos convencionales (Eleftheriou et al., 2022). Por su parte, Escamilla (2018) identificó que el acero de refuerzo representa entre el 24% y el 37% del impacto ambiental en estructuras de concreto armado, reforzando la necesidad de considerar materiales con menor huella de carbono (Escamilla et al., 2018).

1.4.4 Sistema constructivo de bahareque

El bahareque es un sistema tradicional que combina caña guadua, barro y madera, formando paneles estructurales que se recubren con una mezcla de tierra o cemento. Su origen se remonta a las regiones tropicales de América Latina y Asia, y ha sido utilizado históricamente en zonas sísmicas por su flexibilidad y ligereza (Mite-Anastacio et al., 2022).

En el contexto ecuatoriano, uno de los materiales locales con mayor potencial para la aplicación del bahareque es la caña guadua. Esta especie, perteneciente a la familia del bambú, ha demostrado tener propiedades estructurales destacables como resistencia a la compresión, tracción y flexibilidad (Hernández, 2018). Además, su rápido crecimiento, bajo peso y accesibilidad económica la convierten en una alternativa viable frente a materiales industrializados como el acero y el hormigón (Hernandez, 2018; Rodríguez-Díaz et al., 2023). Para apoyar su implementación, el Manual Andino de Construcción en Bahareque establece criterios técnicos para su diseño y aplicación en viviendas unifamiliares (Luis Lopez, 2015).

Este sistema destaca por su bajo costo, facilidad de montaje, bajo consumo energético y su integración con el entorno. En términos estructurales, la caña guadua presenta una resistencia a la compresión de hasta 190 kg/cm^2 , lo que permite su uso en elementos como columnas, vigas y correas (Tello-Ayala & Narvaez-Moran, 2022).

1.4.5 Sistema estructural de concreto armado

El sistema de concreto armado destaca por su adaptabilidad estructural y su capacidad de diseño, lo que le permite ajustarse a variadas tipologías arquitectónicas y demandas de carga. Según estudios recientes, este sistema facilita la ejecución de estructuras gracias a la integración eficiente de hormigón y acero, permitiendo que las edificaciones soporten tanto esfuerzos de compresión como de tracción. Esta capacidad ha consolidado al concreto armado como la alternativa preferida para edificaciones residenciales, donde se requiere durabilidad y capacidad de carga continua (Nouri et al., 2025).

No obstante, el uso intensivo de materiales como el cemento, el acero y los agregados ha convertido al concreto armado en uno de los principales responsables de la huella de carbono generada por el sector de la construcción. Este sector, en su conjunto, es responsable de aproximadamente el 30% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero liberadas anualmente a la atmósfera (Eřtoková et al., 2022). En particular, La industria del cemento representa aproximadamente el 8% de las emisiones globales de CO_2 , mientras que la fabricación del acero contribuye con grandes cantidades adicionales (Andrew, 2018). Investigadores han comparado diferentes sistemas de losa (sólida, aligerada, prefabricada), concluyendo que las opciones optimizadas (por ejemplo, losas nervadas o con tecnología pos-tensada) reducen significativamente las emisiones embebidas, evidenciando la necesidad de incorporar estrategias de eficiencia material en el diseño estructural (Paknahad et al., 2025)

Por otro lado, estudios de análisis de ciclo de vida (ACV) han evidenciado que una vivienda de concreto armado puede emitir hasta 90 kgCO₂e/m², frente a los 25 kgCO₂e/m² que emite una vivienda de bahareque, lo que representa una diferencia del 73% (Tello-Ayala & Narvaez-Moran, 2022).

1.4.6 Evaluación de sostenibilidad en la construcción

La sostenibilidad en edificación exige métodos que integren diversas dimensiones, ambiental, económica y social, y permitan ponderar indicadores más allá del costo o tiempo de ejecución. En este sentido, los sistemas de certificación internacional como BREEAM, LEED y HQE se utilizan ampliamente para medir la eficiencia energética, el consumo hídrico, la selección de materiales, la calidad interna y la gestión de residuos, basados en criterios multidimensionales que aportan una valoración más holística de los edificios (Kouka et al., 2024).

Sin embargo, estos modelos fueron desarrollados originalmente en el hemisferio norte, por lo que pueden presentar limitaciones al aplicarse en contextos latinoamericanos. En respuesta, diversos países de la región han elaborado normas y herramientas propias orientadas a incorporar parámetros sociales, culturales y económicos locales. Por ejemplo, Zepeda-Gil y Natarajan (2020) identificaron 94 reglamentos regionales de construcción sustentable en nueve países, destacando la implementación de incentivos fiscales y certificaciones para edificación residencial con adaptaciones al contexto latinoamericano (Zepeda-Gil & Natarajan, 2020).

Como complemento, se han desarrollado marcos integradores de evaluación de sostenibilidad de edificios que consideran el ciclo de vida completo, desde la extracción de materia prima hasta la disposición final, incluyendo impactos económicos y sociales (Rosa & Haddad, 2013). Tran et al. (2023) presentaron un marco integrado de sostenibilidad, capaz de generar indicadores ambientales, económicos y sociales utilizando técnicas como análisis de ciclo de vida

y decisiones multicriterio (Tran et al., 2023). Esto permite comparar diversas alternativas de diseño y materiales con criterios objetivos y contextualizados.

1.4.7 Modelo MIVES: evaluación integral de sostenibilidad

Para evaluar de manera equilibrada la sostenibilidad en la construcción, se necesita una metodología que traduzca criterios diversos (económicos, ambientales y sociales) en un índice comparable. El Modelo Integrado de Valor para Evaluación Sostenible (MIVES), desarrollado por la Universidad Politécnica de Cataluña, cumple con este objetivo inmerso en el contexto de la construcción. Su enfoque multicriterio permite integrar mediciones cuantitativas (como ACV o análisis de costos) con aspectos cualitativos propios del entorno local, como impacto social y aceptación comunitaria (La Fuente & Fernández-Ordóñez, 2018; Medrán et al., 2024).

Un aspecto relevante del uso de MIVES en edificación es su capacidad para armonizar resultados cuantitativos (como los obtenidos de un ACV o de análisis económico) con criterios cualitativos y contextuales, tales como la aceptación social, la viabilidad local y la adaptabilidad técnica. Por ejemplo, Pons et al. (2016) destacan que MIVES se basa en funciones de valor y seminarios de expertos, lo cual minimiza la subjetividad al asignar pesos y ponderar criterios en decisiones sobre construcción sostenible (Pons et al., 2016).

Además, su flexibilidad ha permitido su aplicación en diversos contextos de construcción. Por ejemplo, Medrán et al. (2024) aplicaron MIVES para evaluar sistemas de vivienda industrializada, descubriendo que su capacidad holística (considerando ámbitos ambiental, económico y funcional) facilita un análisis comparativo sólido de soluciones residenciales (Medrán et al., 2024). De igual forma, en estudios previos, se ha empleado MIVES para analizar estructuras de concreto prefabricado en entornos urbanos, concluyendo que este enfoque permite identificar claramente compromisos y optimizaciones cuando se contraponen sostenibilidad con costos y eficiencia técnica (Boix-Cots et al., 2022).

Capítulo 2

2. Metodología.

Este estudio adopta un enfoque de evaluación multicriterio para comparar la sostenibilidad de los sistemas estructurales. Para ello, se utilizó el Modelo Integrado de Valor para la Evaluación de la Sostenibilidad (MIVES), que permite un análisis objetivo de diversas alternativas considerando aspectos económicos, ambientales y sociales. Este enfoque proporciona una visión integral que facilita la toma de decisiones en el sector de la construcción sostenible.

2.1 Descripción de MIVES

MIVES es un enfoque de toma de decisiones que se distingue por incorporar múltiples criterios para evaluar diferentes alternativas dentro de un problema mediante un índice de sostenibilidad (IS). Este IS se deriva de la suma ponderada de las evaluaciones de los diversos criterios e indicadores considerados (Josa et al., 2020). Este método comprende cinco fases distintas (Figura 1).

Figura 1 Esquema metodológico: Modelo Integrado de Valor para la Evaluación Sostenible (MIVES).



La fase inicial consiste en la delimitación del alcance de la toma de decisiones, que abarca el establecimiento de límites para el objetivo y el sistema analizado. La fase posterior consiste en la definición del árbol de decisiones, que organiza jerárquicamente los criterios e indicadores sujetos a evaluación. Esta estructura jerárquica comienza con los pilares de sostenibilidad (económico, ambiental, social) en el primer nivel, seguidos de los criterios y, finalmente, los

indicadores específicos en el siguiente nivel. En la tercera fase, se utilizan funciones generadoras de valor para normalizar las variables indicadoras, ya que estas pueden tener diferentes unidades. Estas funciones transforman los datos en un rango estandarizado (de 0 para máxima satisfacción a 1 para mínima satisfacción) mediante la aplicación de funciones con diversas formas, como lineal, cóncava, convexa o en forma de S. Las funciones de valor se obtienen aplicando las ecuaciones (1) y (2), donde X_i representa el valor de los datos para el indicador de interés, C_i es aproximadamente el punto de inflexión en el eje x, K_i es aproximadamente el punto de inflexión en el eje y, y P_i es un factor que define la forma del gráfico. La cuarta fase consiste en asignar pesos a los indicadores para combinarlos en un único índice de sostenibilidad. Finalmente, en la quinta fase, se evalúan las alternativas tras analizar todos los requisitos, criterios e indicadores definidos en las fases anteriores (Apéndice A).

$$V_{ind} = B * \left[1 - e^{-K_i \left(\frac{|X_i - X_{min}|}{C_i} \right)^{P_i}} \right] \quad (1)$$

$$B = \left[1 - e^{-K_i \left(\frac{|X_{max} - X_{min}|}{C_i} \right)^{P_i}} \right]^{-1} \quad (2)$$

2.2 Métodos de Construcción

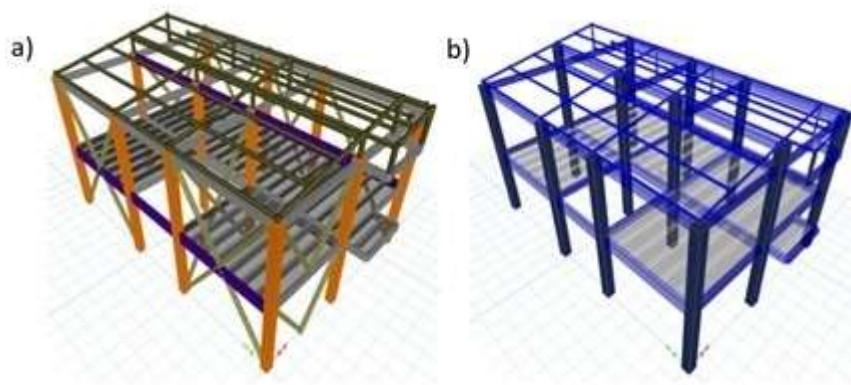
El objetivo de este estudio de caso es evaluar y comparar la sostenibilidad de distintas soluciones constructivas para viviendas de bajo costo, incluidos los sistemas estructurales de bahareque y hormigón convencional. Ambas alternativas consideran una vivienda unifamiliar de dos pisos, con 3 pórticos a lo largo del eje x y 4 pórticos a lo largo del eje y. El objetivo del diseño estructural fue garantizar la seguridad y funcionalidad de dos sistemas constructivos aplicados a la vivienda: bahareque y hormigón armado. Se evaluaron sus propiedades mecánicas y comportamiento ante cargas gravitacionales y sísmicas, siguiendo la normativa ecuatoriana.

(NEC-2015 (NEC-SE-CG, 2015) y NEC-DR-BE 2016 (Luis Lopez, 2015)). A continuación, se describen las dos soluciones consideradas en el ámbito de este estudio (Figura 2):

- a) Sistema estructural Bahareque: Este es un sistema constructivo que no se utiliza habitualmente pero que puede jugar un papel fundamental en la fase de construcción debido a su relevancia local y al uso de recursos naturales renovables. En el diseño del sistema bahareque se utilizó caña guadua como principal material estructural debido a sus propiedades sostenibles y su alta resistencia. La caña guadua considerada en el diseño de la casa tiene una resistencia a la compresión de 190 kg/cm^2 . Las vigas y las columnas estaban compuestos por secciones huecas de caña guadúa, mientras que la cimentación consistía en zapatas de hormigón armado de $1,00 \times 1,00 \text{ m}$. Las columnas incluían cuatro cañas de Guadua de $0,12 \text{ m}$ de diámetro exterior y $0,014 \text{ m}$ de espesor. También se realizó el análisis estructural mediante un programa de elementos finitos, verificando los estados límites de servicio y el cumplimiento de los esfuerzos permisibles según la NEC-DR-BE 2016 (Norma Andina para el Diseño y Construcción de Viviendas de Uno y Dos Pisos en Bahareque Cementado) (Luis Lopez, 2015). El periodo fundamental de vibración fue de $0,28 \text{ s}$, y las derivas máximas en los ejes X ($0,008$) e Y ($0,009$) estuvieron por debajo del límite permisible de 2% (Tello-Ayala & Narvaez-Moran, 2022).
- b) Sistema estructural de hormigón armado: Es el sistema constructivo actualmente más utilizado en viviendas residenciales, el cual comprende una estructura resistente con marcos de concreto armado. El diseño del sistema de hormigón armado se basó en un análisis detallado utilizando un programa de elementos finitos, considerando vigas, columnas y losas nervadas macizas de acuerdo con la norma ACI 318-19 (ACI, 2019). Las propiedades de los materiales incluyeron hormigón con una resistencia a la

compresión de 210 kg/cm^2 y acero de refuerzo A706 gr. 60 con 4200 kg/cm^2 . La cimentación consistió en zapatas de $1,20 \times 1,20 \text{ m}$ y $1,30 \times 1,30 \text{ m}$ con espesores de $0,25 \text{ m}$. Los estados límite de servicio y las derivas se verificaron de acuerdo con NEC-2015. La deformación vertical máxima fue de $2,74 \text{ mm}$, cumpliendo ampliamente con el límite permitido de $13,21 \text{ mm}$ ($L/240$). Asimismo, el periodo fundamental de vibración fue de $0,26 \text{ s}$, y las derivas máximas en el eje X ($0,005$) y en el eje Y ($0,01$) estuvieron dentro del límite del 2% (Tello-Ayala & Narvaez-Moran, 2022).

Figura 2 Modelo analítico de cada alternativa: a) Bahareque y b) Concreto armado (Rocha-Tamayo et al., 2025)



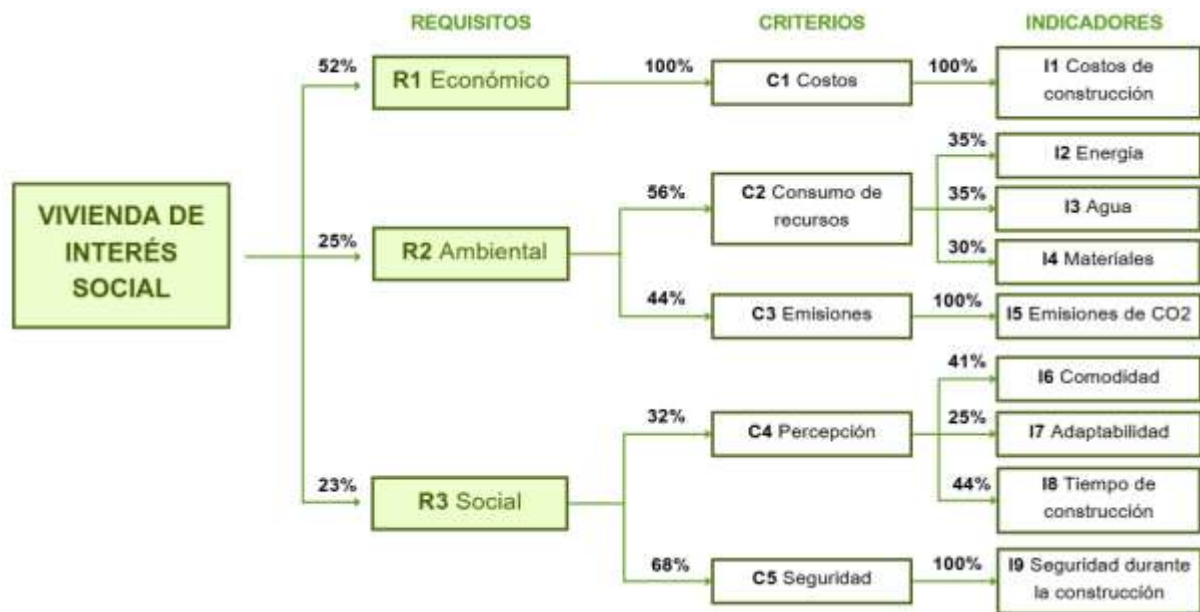
2.3 Modelo de decisión

El modelo de decisión utilizado en esta investigación se desarrolló a partir de la definición de un árbol de decisión basado en esquemas propuestos en estudios anteriores. Para su estructuración, se realizó una revisión exhaustiva de la literatura relevante, con especial atención a la evaluación de la sostenibilidad en los sistemas constructivos. En particular, se analizaron modelos de toma de decisiones multicriterio aplicados al uso de materiales locales y no tradicionales (Asensio et al., 2023; Cárdenas-Gómez et al., 2021; Gilani et al., 2022; Josa et al., 2020). Por otra parte, la ponderación de los requisitos, criterios e indicadores se determinó mediante encuestas realizadas a 20 expertos en la materia. Estas encuestas proporcionaron datos que posteriormente se analizaron mediante métodos estadísticos para establecer las ponderaciones

finales de cada requisito. El árbol de decisión final (Figura 3) se elaboró combinando los resultados de la revisión bibliográfica con las ponderaciones obtenidas estadísticamente a partir de las encuestas a expertos. Se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se elaboraron y diseñaron encuestas a expertos para determinar la ponderación de cada requisito, criterio e indicador. Los participantes asignaron un porcentaje de importancia a cada elemento en función de su relevancia en el contexto del proyecto.
- Las ponderaciones asignadas a los requisitos, criterios e indicadores se establecieron mediante encuestas estructuradas a expertos, en las que se pidió a los profesionales que asignaran valores porcentuales que representaran la importancia relativa de cada componente. Estas respuestas individuales se promediaron a continuación para obtener las ponderaciones finales, garantizando una representación basada en el consenso. Este proceso permitió construir un árbol de decisión jerárquico, en el que los indicadores normalizados se agregaron en función de las ponderaciones asignadas. La ponderación influyó directamente en el Índice de Sostenibilidad (IS) al priorizar la contribución de cada criterio; económico, ambiental y social, sobre la base del juicio de los expertos, lo que permitió una evaluación equilibrada y sensible al contexto.

Figura 3 *Árbol de decisión para vivienda de interés social*



2.3.1 Requerimientos económicos

En el árbol de decisión establecido, el primer requisito (económico) abarca un único criterio: los costos. El indicador asociado, los costos de construcción, abarca la adquisición de materias primas, su transporte y fabricación, así como el transporte de los productos de construcción a la obra y la construcción del edificio. Los datos correspondientes a este indicador se recopilaron de estudios que evaluaron los costos de construcción de viviendas unifamiliares con características y áreas similares (Reyes-quijije et al., 2022; Tello-Ayala et al., 2023). El indicador de costo de construcción adopta una función decreciente en forma de S (DS), ya que refleja cómo la sostenibilidad económica disminuye progresivamente a medida que aumenta el costo.

El presupuesto estructural de las viviendas se elaboró considerando un esquema de descomposición de la obra que abarcó desde las obras preliminares hasta los elementos indirectos. Para cada estructura, se detallaron las actividades y materiales específicos según sus características constructivas, lo que garantiza la precisión de los costos. En el caso de las viviendas de bahareque, la fase preliminar incluyó la limpieza del terreno y el movimiento de tierras, seguida de una

estructura compuesta por elementos de caña guadua, como columnas, vigas, arriostramientos y entrepisos. La cimentación incorporó zapatas y bases de bloques, mientras que la estructura de la cubierta utilizó correas de caña guadua con un revestimiento asfáltico sobre paneles de madera, adaptándose a las características únicas del sistema. El análisis de costos unitarios consideró materiales, mano de obra, equipo y otros factores relevantes, con costos de mano de obra basados en los salarios mínimos establecidos por la Contraloría General del Estado (Tello-Ayala & Narvaez-Moran, 2022).

Por otro lado, la casa de hormigón armado incluyó actividades preliminares similares, como desmonte y movimiento de tierras, pero su sistema estructural consistió en hormigón y elementos de acero de refuerzo, incluyendo zapatas, arriostramientos, columnas, vigas, losas nervadas y escaleras. Además, se incorporó una cubierta metálica con fibrocemento. Los costos indirectos incluyeron contingencias, diseños y pólizas de seguro (Tello-Ayala & Narvaez-Moran, 2022).

El presupuesto final mostró un costo total de \$8,488.75 para la casa de bahareque y \$12,909.87 para la de concreto reforzado, ambas con un área de construcción de 103 m² (Tello-Ayala & Narvaez-Moran, 2022). Las estimaciones completas de costos, junto con las cantidades de obra y el análisis de precios unitarios, se adjuntan en el Apéndice B.

2.3.2 Requerimientos ambientales

El requisito ambiental incluye dos criterios: consumo de recursos y emisiones. El criterio C2 (consumo de recursos) abarca tres indicadores: energía, agua y materiales, mientras que el criterio C3 (emisiones) tiene como indicador las emisiones de CO₂. Al igual que los indicadores anteriores, los datos para estos indicadores se obtuvieron de estudios que consideraron las fases de producción y construcción de la vivienda, obteniendo así los resultados del consumo de agua, energía y materiales asociados a la construcción de la estructura, así como las emisiones de CO₂.

que genera. Los indicadores I2 (energía), I3 (agua) e I5 (emisiones de CO₂) tienen una función decreciente en forma de S, mientras que I4 (material) considera una función lineal creciente (LC).

Para determinar los indicadores I2 (energía) e I3 (agua), se obtuvieron los valores de consumo de un estudio previo en una estructura de hormigón armado con una superficie de 84 m² (Reyes-quijije et al., 2022). Estos valores se ajustaron proporcionalmente a la superficie de 103 m² de la estructura analizada en el presente estudio, garantizando así que los indicadores ambientales reflejen con precisión las características y la escala del caso de estudio.

El indicador I4 (material) se evaluó mediante encuestas, considerando tres aspectos fundamentales: la escasez de materias primas, el potencial de reciclaje y la incorporación de materiales reciclados (Josa et al., 2020). Cada uno de estos criterios se evaluó mediante una escala del 1 al 3, donde 1 indica un cumplimiento insuficiente, 2 representa un cumplimiento moderado y 3 corresponde a un cumplimiento excelente.

En el caso del sistema de bahareque, se utilizó caña guadua, reconocida por su sostenibilidad y beneficios ecosistémicos, aunque requirió tratamientos químicos para aumentar su durabilidad frente a factores externos. En contraste, el hormigón armado incorporó materiales como cemento, agua, arena, grava y acero, provenientes principalmente de proveedores locales.

Para el indicador I5 (emisiones de CO₂), se realizó un análisis comparativo del ciclo de vida (ACV) de ambos sistemas constructivos: bahareque y hormigón armado. Este análisis tuvo como objetivo determinar la cantidad de carbono incorporado en cada fase estructural, desde la fabricación hasta la construcción, y evaluar cuál de las dos opciones es más sostenible en términos de emisiones de carbono, de acuerdo con los estándares internacionales de sostenibilidad. El análisis se centró en las fases estructurales de cada sistema constructivo, considerando una vida útil de 40 años. Se evaluaron las fases entre A1 y A5, que abarcan desde la fabricación de materiales (A1-A3), su transporte a la obra (A4) y los residuos generados durante el proceso

constructivo (A5). El alcance incluyó únicamente los elementos estructurales y las emisiones de carbono incorporadas asociadas (Tello-Ayala & Narvaez-Moran, 2022).

2.3.3 Requerimientos sociales

El requisito social se evalúa mediante dos criterios: percepción y seguridad. El criterio C5 (percepción) incluyó tres indicadores: comodidad, adaptabilidad y tiempo de construcción; mientras que el criterio C6 (seguridad) incorpora un único indicador que evalúa la seguridad durante la construcción. Los datos de estos indicadores se obtuvieron mediante encuestas realizadas a 20 expertos en la materia. Los indicadores I6 (comodidad), I7 (adaptabilidad) e I9 (seguridad durante la construcción) adoptaron una función lineal creciente (LC), mientras que el indicador I8 (tiempo de construcción) consideró una función lineal decreciente (DL).

Para la evaluación del indicador I6 (comodidad), se consideraron dos aspectos fundamentales: la del elemento estructural y la calidez del material (Josa et al., 2020).

La encuesta tuvo como objetivo comparar los sistemas constructivos de bahareque y hormigón armado con base en criterios sociales y constructivos. Esta evaluación buscó determinar el grado de cumplimiento de cada sistema con los requisitos para vivienda asequible. Los participantes calificaron diversos aspectos de cada sistema estructural mediante una escala del 1 al 3, donde 1 indicaba cumplimiento insuficiente, 2 cumplimiento moderado y 3 cumplimiento excelente. Se evaluaron la percepción social, la seguridad y el tiempo de construcción, considerando factores como el uso de materiales reciclados, la adaptabilidad a los contextos locales y la seguridad durante el proceso constructivo. Finalmente, se utilizó la moda de las respuestas, ya que proporcionaba los resultados más coherentes para los aspectos analizados.

2.4 Parámetros de funciones de valor

Una vez determinada la forma de las funciones de valor según la naturaleza de cada indicador, se establecieron los parámetros que definen dichas funciones, tal como se detalla en la

Tabla 1. Los gráficos correspondientes pueden examinarse en el Apéndice A para su posterior análisis.

La definición de estas funciones de valor se basó en una revisión exhaustiva de la literatura para obtener los parámetros necesarios. Los estudios revisados se centraron en estructuras similares a viviendas unifamiliares de dos plantas con áreas de construcción comparables, analizando aspectos clave como el presupuesto, el consumo de recursos y la huella de carbono (Remigio, 2016; Reyes-quijije et al., 2022; Tello-Ayala & Narvaez-Moran, 2022). Además, para los indicadores sociales, los parámetros se establecieron garantizando un enfoque basado en datos que refleja las perspectivas de los profesionales del sector.

Tabla 1 *Parámetros definidos para las funciones de valor de cada indicador*

Indicadores	Unidad	Función	X _{min}	X _{máx}	C	K	P
I1. Costos de construcción	\$	DS	55000	0	50000	2.5	4
I2. Energía	MJ	DS	1100000	0	190000	0.1	2
I3. Agua	m ³	DS	350	0	140	0.1	2.5
I4. Material	Puntos	LC	3	9	1	0	1
I5. Emisiones CO ₂	Kg CO ₂	DS	100000	0	300000	0.1	2.5
I6. Comodidad	Puntos	LC	2	6	1	0	1
I7. Adaptabilidad	Puntos	LC	1	3	1	0	1
I8. Tiempo de construcción	Puntos	DL	3	1	1	0	1
I9. Seguridad durante construcción	Puntos	LC	1	3	1	0	1

2.5 Cuantificación de indicadores

El cálculo del índice de sostenibilidad se basó en los datos presentados en la Tabla 2. Los datos correspondientes se obtuvieron para cada indicador de acuerdo al análisis realizado previamente en las secciones 2.3.1., 2.3.2. y 2.3.3.

Tabla 2 Datos para evaluación de sostenibilidad

Indicadores	Unidad	Bahareque	Concreto armado
I1. Costos de construcción	\$	8488.75	12909.87
I2. Energía	MJ	946.93	946.93
I3. Agua	m ³	25.94	25.94
I4. Material	Puntos	9	7
I5. Emisiones CO ₂	Kg CO ₂	25	94
I6. Comodidad	Puntos	5	6
I7. Adaptabilidad	Puntos	2	3
I8. Tiempo de construcción	Puntos	3	2
I9. Seguridad durante construcción	Puntos	3	2

2.6 Análisis de sensibilidad

Para evaluar la robustez y la fiabilidad de los resultados obtenidos, se realiza un análisis de sensibilidad. Este consiste en proponer variaciones en los pesos o funciones de valor definidos en el modelo de decisión para observar cómo estos cambios afectan el resultado final y la clasificación de alternativas (Viñolas Prat et al., 2009). Estos cambios son necesarios para considerar diferentes factores que influyen en la toma de decisiones, como las costumbres, la ubicación geográfica y los requisitos del proyecto (Asensio et al., 2023).

Debido al enfoque de la investigación y a los estudios previos, se consideraron cuatro escenarios en esta evaluación. El primer escenario asigna la misma ponderación a los tres requisitos (económico, ambiental y social). En el segundo escenario, la ponderación del requisito económico es del 70%, mientras que los requisitos ambientales y sociales tienen un 15% cada uno. En el tercer escenario, el requisito ambiental recibe el 70% de la ponderación, dejando el 15% para los otros dos. Finalmente, en el cuarto escenario, el requisito social se prioriza con una ponderación del 70%, mientras que los requisitos económicos y ambientales reciben el 15% cada uno.

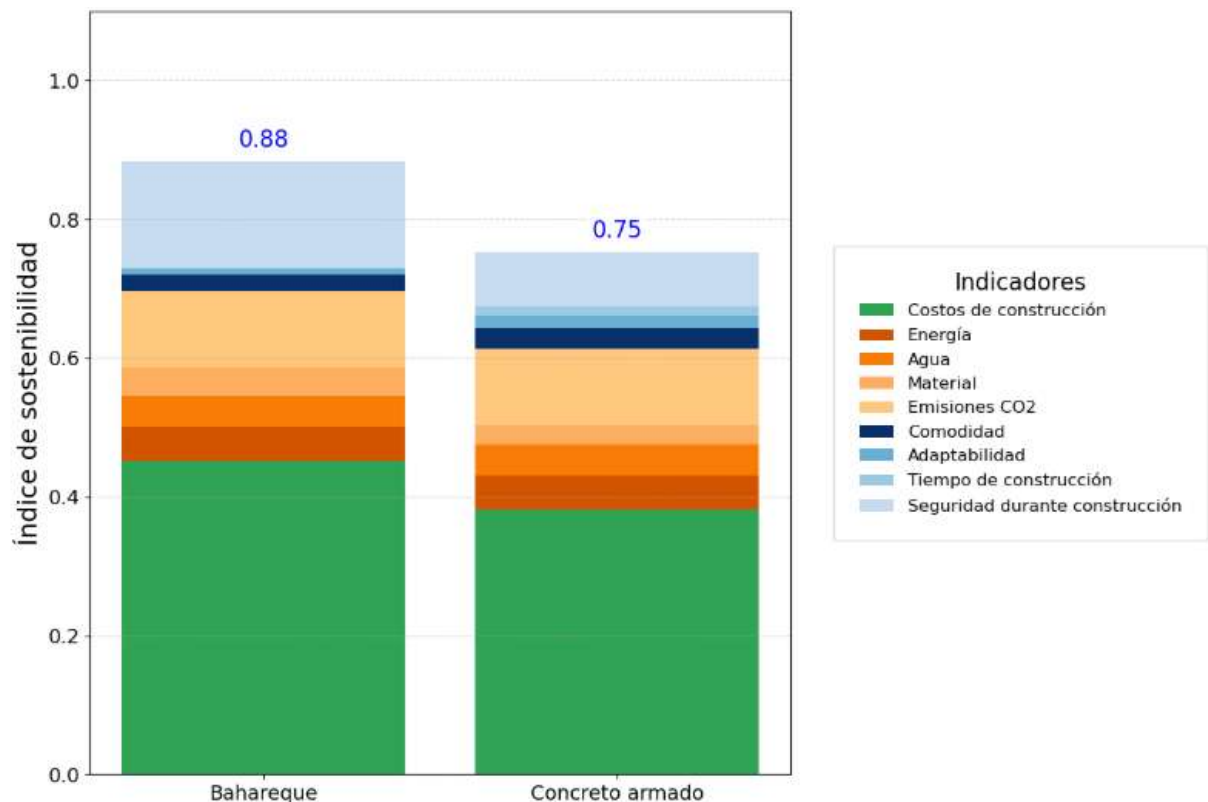
Capítulo 3

3. Resultados y análisis

3.1 Resultados de índice de sostenibilidad global

La Figura 4 muestra los resultados del Índice de Sostenibilidad para los sistemas de bahareque y hormigón armado. El sistema de bahareque obtuvo un índice más alto (0,88) en comparación con el hormigón armado (0,75), lo que refleja su mejor desempeño en términos de costos de construcción, menor impacto ambiental y ventajas sociales. En el desglose por indicadores, el bahareque destacó especialmente en costos de construcción, emisiones de CO₂, confort térmico y adaptabilidad. Por su parte, el hormigón armado mostró fortalezas en seguridad durante la construcción y en la disponibilidad de materiales más industrializados.

Figura 4 Resultados de índice de sostenibilidad con la contribución de cada indicador (Rocha-Tamayo et al., 2025)



En términos económicos, el sistema de bahareque fue más eficiente, con una contribución del 49,6% al índice total. Este resultado se debe a sus bajos costos de implementación y

mantenimiento, que se reflejan en el uso de materiales locales y un proceso de construcción más económico. En particular, el análisis de costos muestra que los elementos estructurales de bahareque representan un 38% menos en comparación con la alternativa de hormigón armado (Apéndice B). Asimismo, en el rubro de cubierta, se observa una reducción del 29% en el presupuesto final del bahareque, atribuida al uso de correas de caña de guadua en su estructura.

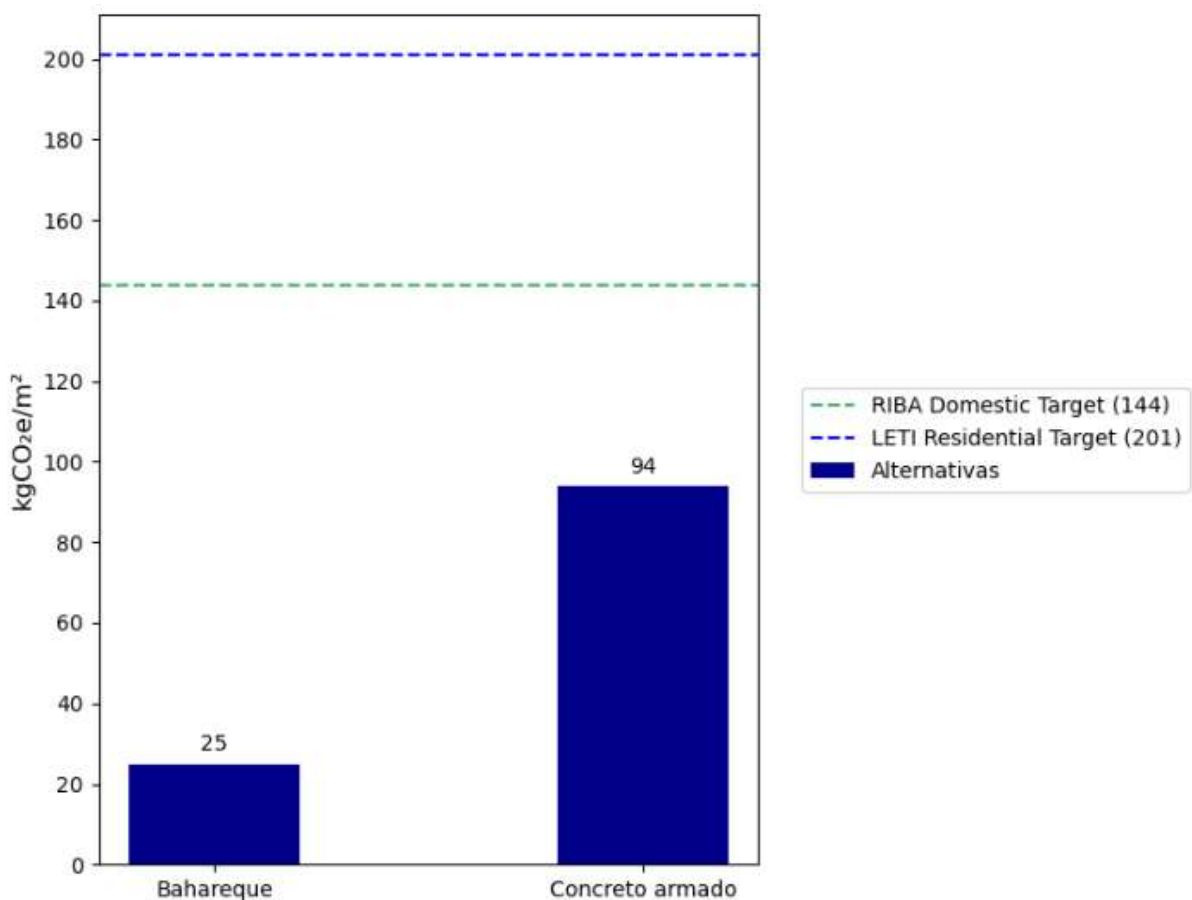
En el criterio ambiental, el sistema de bahareque destacó, con una contribución del 28,5 % al índice total, debido a su bajo impacto ambiental derivado del uso de materiales locales, como la caña de guadua. Esta característica es fundamental para su sostenibilidad, ya que permite una reducción significativa de las emisiones de CO₂. Los resultados del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) evidenciaron que la estructura de bahareque generó solo el 27 % del carbono incorporado en comparación con la vivienda de hormigón armado.

En contraste, el sistema de hormigón armado presentó una mayor huella ecológica, con una contribución del 30,7 % al índice ambiental. Este impacto se atribuye al uso de materiales industrializados, que generan altas emisiones de CO₂. En particular, la fase de fabricación fue la más crítica en términos de emisiones de carbono para ambas estructuras. En el caso del bahareque, esta etapa representó el 66 % de las emisiones totales, mientras que en el hormigón armado alcanzó el 90 % (Tello-Ayala et al., 2023).

En términos sociales, el sistema bahareque obtuvo una contribución del 21.9%, lo que refleja una mayor aceptación en las encuestas debido a sus menores tiempos de ejecución y la reducción de riesgos durante la construcción. En contraste, el hormigón armado presentó una contribución social del 18.6%, destacando principalmente por su valor estético percibido por los usuarios y su adaptabilidad a diferentes contextos constructivos a nivel mundial. Su amplio uso a nivel mundial respalda su versatilidad y aceptación en la industria de la construcción.

Estos resultados permiten afirmar que la construcción con bahareque genera emisiones de carbono significativamente menores que el hormigón armado, como se ilustra en la Figura 5. El carbono incorporado del bahareque fue de 25 kgCO₂e/m², lo que representa solo el 27 % del carbono incorporado en el hormigón armado. En el hormigón armado, las fases de fabricación representaron aproximadamente el 90 % de las emisiones totales, mientras que en el bahareque estas fases contribuyeron con el 66 % (Tello-Ayala et al., 2023). Estos hallazgos establecen al bahareque como una alternativa estructural más sostenible, alineándose con los objetivos de reducción de emisiones establecidos por organizaciones internacionales como LETI (201 kgCO₂e/m²) (LETI, 2020) y RIBA (144 kgCO₂e/m²) (RIBA, 2021).

Figura 5 Comparación de las emisiones de carbono de ambos sistemas estructurales (Rocha-Tamayo et al., 2025)



Además, en cuanto al desempeño estructural de ambos sistemas, se encontró que ambos cumplían con las normas de deformación y deriva establecidas en el NEC-2015. Sin embargo, el

hormigón armado presentó mayor rigidez, con una deformación máxima de 2,74 mm en comparación con la del bahareque. En cuanto a las derivas, los valores máximos fueron menores en el hormigón armado (0,005 en el eje X y 0,01 en el eje Y) en comparación con el bahareque (0,008 en el eje X y 0,009 en el eje Y). Esto refleja la mayor flexibilidad del bahareque (Tello-Ayala & Narvaez-Moran, 2022).

3.2 Resultados del análisis de sensibilidad

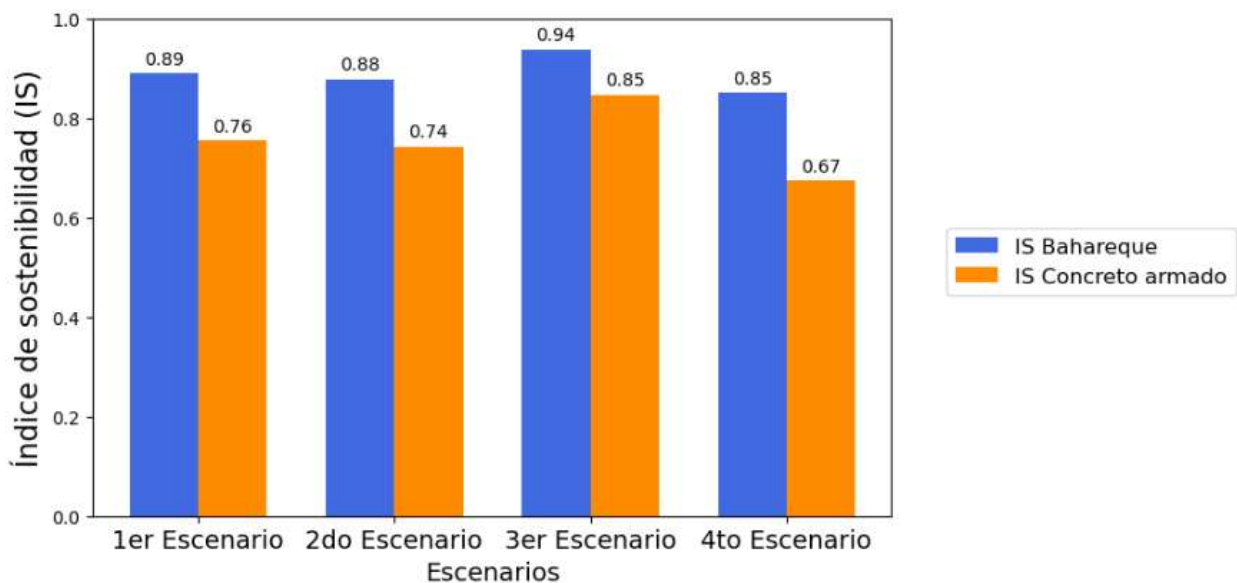
Los resultados del análisis de sensibilidad, presentados en la Figura 6, muestran que el sistema estructural de bahareque mantiene un índice de sostenibilidad (IS) más alto en todos los escenarios analizados. En el escenario de igual ponderación, el bahareque logró un IS de 0,89, mientras que el hormigón armado alcanzó 0,76. En el escenario con mayor ponderación económica, el bahareque mantuvo su ventaja con un IS de 0,88, en comparación con el hormigón armado con 0,74. Cuando se prioriza el requisito ambiental, el bahareque mostró un aumento significativo en su IS, alcanzando 0,94, mientras que el hormigón armado también mejoró, alcanzando 0,85. En el último escenario, con un peso social predominante, el bahareque obtuvo un IS de 0,85, superando nuevamente al hormigón armado, que disminuyó a 0,67.

Cabe destacar que, en el tercer escenario, el sistema bahareque alcanzó un valor excepcional de 0,94. Este resultado se atribuye a la naturaleza de las funciones de valor y a los parámetros que las determinan, lo que resalta la importancia de ajustar estos parámetros según los objetivos específicos de la investigación y el contexto en el que se lleva a cabo. En el Apéndice A y en la metodología se ofrece una explicación detallada de la formulación y la influencia de estos parámetros.

Estos resultados confirman la robustez del sistema estructural de bahareque en términos de sostenibilidad, destacando especialmente en los escenarios donde se priorizan los requisitos ambientales y sociales. Por el contrario, el hormigón armado mostró una disminución más notable

en su índice de sostenibilidad en los escenarios donde los requisitos ambientales o sociales tienen mayor peso, lo que refleja su mayor impacto ambiental y menores beneficios sociales en comparación con el bahareque.

Figura 6 Resultados de análisis de sensibilidad (Rocha-Tamayo et al., 2025)



3.3 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en este estudio reflejan el superior desempeño en sostenibilidad del sistema bahareque (0.88), en comparación con el hormigón armado (0.75). Esta tendencia coincide con estudios previos que han evaluado otras soluciones constructivas sostenibles. Por ejemplo, investigaciones sobre técnicas de adobe armado para la reconstrucción en zonas sísmicas andinas han reportado índices de sostenibilidad de 0.714 y 0.709 para sistemas con refuerzo de caña y cuerdas de amarre, respectivamente (Cárdenas-Gómez et al., 2021). Estos valores, aunque relativamente altos, se mantienen por debajo del índice obtenido para el hormigón armado en este estudio (0.75). Esto puede deberse a la ponderación y los criterios específicos aplicados en el modelo MIVES, que pueden favorecer al hormigón armado en ciertas dimensiones de

sostenibilidad, como la seguridad estructural o el desempeño a largo plazo. Sin embargo, ambos se mantienen por debajo del nivel de desempeño del bahareque, que destaca por su equilibrio entre bajo impacto ambiental, accesibilidad económica y adaptabilidad a las condiciones locales.

Además, el hormigón armado, aunque ampliamente utilizado en la industria de la construcción, presenta desventajas en términos de sostenibilidad. Para contextualizar mejor su desempeño, nos remitimos a estudios previos sobre sistemas de cerchas de acero, que, si bien se utilizan con mayor frecuencia en estructuras industriales o de gran escala, ilustran los límites inferiores de los puntajes de sostenibilidad entre los materiales estructurales. Específicamente, estudios previos han determinado que las cerchas de acero tienen índices de sostenibilidad de 0,57 para cerchas planas y 0,53 para cerchas inclinadas (Josa et al., 2020), valores significativamente inferiores tanto al bahareque como al hormigón armado. Si bien el acero es un material reciclable, su proceso de producción genera altas emisiones de CO₂. Aunque las cerchas de acero no se utilizan típicamente en edificios residenciales de pequeña escala, su inclusión en la comparación resalta el espectro más amplio de alternativas estructurales y refuerza el posicionamiento del bahareque como una opción más favorable desde el punto de vista ambiental y económico.

Por otro lado, debido a la menor cantidad de refuerzos de acero utilizados en la estructura de bahareque (Apéndice B), en comparación con materiales convencionales como el hormigón armado, es una alternativa viable para reducir la huella de carbono de la industria de la construcción. Sin embargo, su adopción a gran escala requiere estrategias de difusión técnica, el fortalecimiento de las capacidades locales y un mejor control en las construcciones informales, lo que afecta la calidad estructural y la percepción social de este material (Llumiquirena, 2023).

Finalmente, es necesario considerar el marco regulatorio y los requisitos legales para la construcción en cada país o región. La regulación de técnicas alternativas, como el bahareque, puede representar un obstáculo para su implementación masiva. En este sentido, se recomienda la

colaboración entre gobiernos, universidades y organizaciones especializadas para desarrollar propuestas que impulsen políticas públicas dirigidas a promover materiales y técnicas de construcción sostenibles, como es el caso en Colombia con la Ley de la Guadua (2022), que establece que al menos el 30 % de las viviendas rurales financiadas por el gobierno deben construirse con bambú (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2022).

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

4.1.1 Conclusiones

Este estudio tuvo como objetivo evaluar el desempeño de sostenibilidad de dos sistemas estructurales, bahareque de caña de guadua y hormigón armado convencional, para vivienda social en Ecuador. Para ello, se utilizó el marco de toma de decisiones multicriterio MIVES, que integra indicadores económicos, ambientales y sociales.

. El estudio abarcó una vivienda social típica de dos plantas, que cumple con las normas nacionales de seguridad y funcionalidad. Los datos se recopilaban a partir de análisis de costos, literatura y encuestas a expertos, y posteriormente se normalizaron mediante funciones de valor específicas. Además, se realizó un análisis de sensibilidad con diferentes escenarios de ponderación para garantizar la robustez de los resultados.

Con base en el análisis de los resultados y las discusiones presentadas, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El uso de bahareque (0,88) para la construcción de las viviendas sociales diseñadas resultó en un IS 17,5% mayor al alcanzado con la alternativa de hormigón armado (0,75).
- El diseño de los modelos estructurales de bahareque y concreto armado para la vivienda social tipo permitió evidenciar que el bahareque ofrece importantes reducciones de costos (hasta un 38 % de ahorro en elementos estructurales y un 29 % en techos) gracias a su uso de materiales de origen local y procesos de construcción más sencillos.
- Con solo el 27% de las emisiones de CO₂ producidas por el hormigón armado, el bahareque presenta una huella ambiental notablemente menor, en gran medida debido a un procesamiento de materiales con menor consumo de energía y a menores necesidades de transporte.

- La aplicación del modelo MIVES permitió cuantificar el desempeño de sostenibilidad, revelando que el sistema basado en el uso de bahareque mostró ventajas en velocidad de construcción y adaptabilidad a las condiciones locales, aunque el concreto armado mantuvo puntajes ligeramente superiores en seguridad constructiva y estandarización de materiales.

- El análisis de sensibilidad confirmó que el bahareque mantiene sus ventajas en términos de desempeño de sostenibilidad bajo diversos escenarios de ponderación, ya sea que se prioricen aspectos económicos, ambientales o sociales.

. Cabe destacar que estos hallazgos son específicos del contexto, ya que las variaciones en la disponibilidad local de materiales y las prácticas de construcción regionales podrían influir en los resultados de sostenibilidad. Asimismo, la evaluación se basó en datos de estudios de caso seleccionados y encuestas a expertos, que podrían no reflejar completamente todas las diferencias regionales ni los factores de rendimiento a largo plazo.

4.1.2 Recomendaciones

Tras culminar el desarrollo y análisis de la presente investigación, se identificaron oportunidades relevantes para ampliar y profundizar el estudio de los sistemas estructurales de bahareque y concreto armado aplicados a viviendas de interés social. Las siguientes recomendaciones surgen tanto de las limitaciones encontradas como de la necesidad de explorar nuevas líneas de investigación que fortalezcan el conocimiento técnico, ambiental y social de este tipo de soluciones constructivas.

- Evaluar la escalabilidad del sistema bahareque en diferentes contextos geográficos y climáticos. El presente estudio se centró en un caso tipo en Ecuador; sin embargo, se recomienda analizar su desempeño en otras regiones con distintas condiciones ambientales,

culturales y de disponibilidad de materiales. Esto permitiría validar su aplicabilidad en contextos más amplios y adaptarlo a realidades locales específicas.

- Investigar la viabilidad de sistemas híbridos que combinen técnicas tradicionales y materiales modernos. La integración de bahareque con componentes industrializados o tecnologías innovadoras podría mejorar aspectos como la resistencia estructural, el aislamiento térmico y acústico, y la durabilidad. Estudios futuros deberían evaluar qué combinaciones ofrecen un balance óptimo entre sostenibilidad y desempeño técnico.
- Analizar la durabilidad y necesidades de mantenimiento a largo plazo. Es importante investigar la resistencia del bahareque frente a agentes climáticos, biológicos y sísmicos en períodos prolongados, así como sus requerimientos de mantenimiento para garantizar su funcionalidad a lo largo del tiempo.
- Profundizar en los retos normativos y de aceptación social. La implementación a gran escala del bahareque podría enfrentar barreras regulatorias y de percepción pública. Se recomienda desarrollar estudios que analicen cómo las normativas de construcción pueden adaptarse para incorporar este tipo de soluciones, así como estrategias de comunicación y capacitación para aumentar la confianza de usuarios y profesionales del sector.
- Refinar los parámetros de ponderación en el modelo MIVES. Los pesos utilizados en esta investigación se definieron a partir de encuestas a expertos y literatura técnica; no obstante, incluir la perspectiva de un espectro más amplio de actores, como usuarios finales, autoridades locales y comunidades, permitiría generar un modelo más representativo y participativo.
- Ampliar el análisis de impacto económico y social. Sería valioso evaluar cómo la adopción del bahareque puede influir en la generación de empleo local, la capacitación de mano de

obra y el fortalecimiento de economías comunitarias, especialmente en zonas rurales o de difícil acceso.

Referencias

- ACI. (2019). *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318-19)*.
- Amirtahmasebi, Rana., Vuova, Zuzana., & Fox, E. Olivia. (2020). *The New Urban Agenda*. United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat).
- Andrew, R. M. (2018). Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Science Data*, 10(1), 195–217. <https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018>
- Asensio, J., Josa, I., Monserrat, A., & de la Fuente, A. (2023). 3D-printed concrete footbridges: An approach to assess the sustainability performance. *Structural Concrete*, 24(6), 7705–7725. <https://doi.org/10.1002/suco.202201227>
- Avendaño Castro, W. R., Rueda Vera, G., & Velasco Burgos, B. M. (2021). Construcción sostenible en Colombia: Análisis a partir del Proyecto de Ley No. 208/2019 Cámara. *Revista de Ciencias Sociales*. <https://repositorio.ufps.edu.co/handle/ufps/6574>
- Boix-Cots, D., Pardo-Bosch, F., Blanco, A., Aguado, A., & Pujadas, P. (2022). A systematic review on MIVES: A sustainability-oriented multi-criteria decision-making method. *Building and Environment*, 223(July), 109515. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109515>
- Cárdenas-Gómez, J. C., Gonzales, M. B., & Damiani Lazo, C. A. (2021). Evaluation of reinforced adobe techniques for sustainable reconstruction in andean seismic zones. *Sustainability (Switzerland)*, 13(9), 1–23. <https://doi.org/10.3390/su13094955>
- Castillo, B., Vides, S. M., Marulanda, J., Ortiz, A. R., & Thomson, P. (2024). Seismic performance assessment of a low-rise thin reinforced concrete wall building with unconnected fiber reinforced elastomeric isolators using real-time hybrid simulations. *Journal of Building Engineering*, 89(April), 109303. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109303>
- Couret, D. G., & Párraga, J. F. V. (2019). Evolución de la vivienda de interés social en Portoviejo. *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, 12(23). <https://doi.org/10.11144/javeriana.cvu12-23.evis>
- Edwin, Z. E., Habert, G., & Lopez Muñoz, L. F. (2014). Environmental savings potential from the use of bahareque (mortar cement plastered bamboo) in Switzerland. *Key Engineering Materials*, 600, 21–33. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.600.21>
- Eleftheriou, E., Lopez Muñoz, L. F., Habert, G., & Zea Escamilla, E. (2022). Parametric Approach to Simplified Life Cycle Assessment of Social Housing Projects. *Sustainability (Switzerland)*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/su14127409>

- Escamilla, E. Z., Habert, G., Daza, J. F. C., Archilla, H. F., Echeverry Fernández, J. S., & Trujillo, D. (2018). Industrial or traditional bamboo construction? Comparative life cycle assessment (LCA) of bamboo-based buildings. *Sustainability (Switzerland)*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/su10093096>
- Eřtoková, A., Wolfová Fabiánová, M., & Ondová, M. (2022). Concrete Structures and Their Impacts on Climate Change and Water and Raw Material Resource Depletion. *International Journal of Civil Engineering*, 20(6), 735–747. <https://doi.org/10.1007/s40999-022-00701-8>
- Ghisleni, C. (2024). *Land as Raw Material _ Latin American Homes Built With Locally Sourced Soil _ ArchDaily*. https://www.archdaily.com/1016772/land-as-raw-material-latin-american-homes-built-with-locally-sourced-soil?ad_campaign=special-tag
- Gifreu, J. (2018). Ciudades adaptativas y resilientes ante al cambio climático: Estrategias locales para contribuir a la sostenibilidad urbana. In *Zaragoza* (Vol. 52). <https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/>
- Gilani, G., Hosseini, S. M. A., Pons-Valladares, O., & de la Fuente, A. (2022). An enhanced multi-criteria decision-making approach oriented to sustainability analysis of building facades: A case study of Barcelona. *Journal of Building Engineering*, 54(February), 104630. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104630>
- Gonçalves Almeida, R., Imilan, W., Lekerman, V., Fernandes Moreira, M., & Meza Corvalán, D. (2015). *DÉFICIT HABITACIONAL COMO INSTRUMENTO DE POLÍTICA DE VIVIENDA EN ARGENTINA, BRASIL Y CHILE: Medición y construcción de un problema*.
- Hernandez, E. H. P. (2018). Prototype for sustainable social high-rise housing, an approach to climate change resilience. *Revista INVI*, 33(92), 213–237. <https://doi.org/10.4067/s0718-83582018000100213>
- HEXAGON CONSULTORES. (2008). *Edición Nro. 39: Sector Vivienda: Evolución, Acceso y Déficit Habitacional*.
- Hussain, A., & Kamal, M. A. (2015). Energy efficient sustainable building materials: An overview. *Key Engineering Materials*, 650, 38–50. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.650.38>
- Josa, I., Pons, O., Fuente, A. de la, & Aguado, A. (2020). Multi-criteria decision-making model to assess the sustainability of girders and trusses: Case study for roofs of sports halls. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119312. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119312>

- Kouka, D., Russo, M., & Barreca, F. (2024). Building sustainability assessment: A comparison between ITACA, DGNB, HQE and SBTool alignment with the European Green Deal. *Heliyon*, 10(14). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34478>
- La Fuente, A. De, & Fernández-Ordóñez, D. (2018). A multi-criteria decision-making based approach to assess the sustainability of concrete structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 442(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/442/1/012008>
- Luis Lopez. (2015). *Normativa Andina para diseño y construcciones de casa en Bahareque*. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/03/Bahareque-Encementado.pdf>
- Mahlan, S., Francis, A., Thumuganti, V., Thomas, A., Sadick, A. M., & Tokede, O. (2024). An integrated life cycle assessment and energy simulation framework for residential building walling systems. *Building and Environment*, 257(April), 111542. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111542>
- Medrán, F., Enfedaque, A., & Alberti, M. G. (2024). A Sustainability Assessment of Industrialised Housing Construction Using the MIVES (Modelo Integrado de Valor para una Evaluación Sostenible)-Based Multicriteria Decision-Making Method. *Buildings*, 14(9), 2712. <https://doi.org/10.3390/buildings14092712>
- MIDUVI. (2024). *Informe Narrativo - Rendición de cuentas 2023*. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/2024/03/Informe-Narrativo-de-Rendicion-de-Cuentas-ano-2023-15-03-2024-rev-ml-20-03-2024.pdf>
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2021). *Déficit Habitacional Nacional – MIDUVI – Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda*. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/deficit-habitacional-nacional/>
- Ministerio de interior Obras Públicas y Vivienda, A. (2019). *Manual de vivienda sustentable*.
- Mite-Anastacio, F., Tello-Ayala, K., García-Troncoso, N., Silva, C. E., Malaga-Chuquitaype, C., Arévalo, K., & Villao, D. (2022). Structural behavior of cemented bahareque for social housing: A case study in Guayaquil City, Ecuador. *Frontiers in Built Environment*, 8(October), 1–20. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.922397>
- Momoh, E. O., Osofero, A. I., & Menshykov, O. (2024). Design considerations for eco-friendly palm-strand reinforced concrete for low-cost housing. *Case Studies in Construction Materials*, 20(July 2023), e02929. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02929>
- Naciones Unidas. (2024). *REPORTE ANUAL 2023*.

- NEC-SE-CG. (2015). Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. Cargas no sismicas. In *Norma Ecuatoriana de la Construcción*. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/1.-NEC-SE-CG-Cargas-No-Sismicas.pdf>
- Nouri, Z., Massumi, A., Asadollahfardi, G., & Majedi Ardakani, M. H. (2025). Structural and environmental impacts of concrete quality a comparative life cycle assessment. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01032-z>
- Ordóñez Díaz, M. M., & Meneses Silva, L. C. (2015). Criterios e indicadores de sostenibilidad en el subsector vial. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(2), 81. <https://doi.org/10.18359/rcin.1433>
- Paknahad, C., Tohidi, M., & Bahadori-Jahromi, A. (2025). Improving the Sustainability of Reinforced Concrete Structures Through the Adoption of Eco-Friendly Flooring Systems. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 17, Issue 7). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/su17072915>
- Paucar, D. S. (n.d.). *Consolidación urbana, red de áreas verdes dentro del polígono urbano del cantón Santiago de Pillaro*. Retrieved June 25, 2025, from <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/41201>
- Pérez Godoy, M. C. (2022). Material sostenible es usado actualmente en 35% de proyectos de vivienda del país. In *La República*. <https://www.larepublica.co/responsabilidad-social/material-sostenible-es-usado-actualmente-en-35-de-proyectos-de-vivienda-del-pais-3325123>
- Ponce, A. A. (2025). *Diseño de viviendas eficientes para construcción sostenible mediante certificado EDGE en la comuna Sancán Cantón Jipijapa*. <https://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/7759>
- Pons, O., de la Fuente, A., & Aguado, A. (2016). The use of MIVES as a sustainability assessment MCDM method for architecture and civil engineering applications. *Sustainability (Switzerland)*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/su8050460>
- Ramage, K., Bell, M., Zaretsky, L., Lee, L., & Milaney, K. (2021). Is the right to housing being realized in canada? Learning from the experiences of tenants in affordable housing units in a large canadian city. *Societies*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/soc11020053>
- Remigio, S. A. C. (2016). Análisis de ciclo de vida de una vivienda unifamiliar en Huancayo. In *Implementación De Un Sistema Web Para El Registro De Matrículas Y Pensiones En La I.E.P Isaac Newton Del Distrito Veintiséis De Octubre – Piura; 2022*.

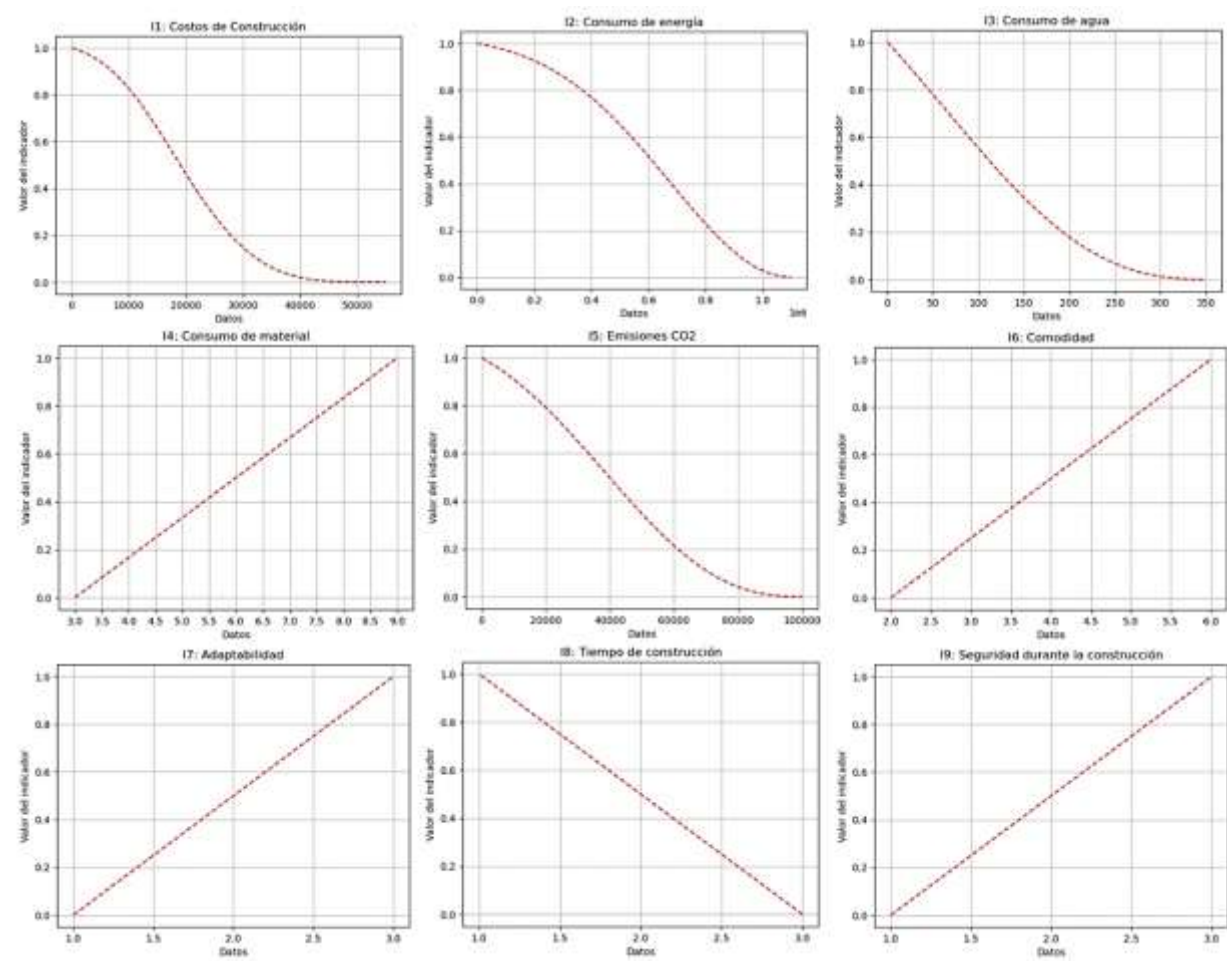
- http://repositorio.upci.edu.pe/bitstream/handle/upci/69/T-LAZARO_RENGIFO_JESSICA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Reyes-quijije, M., Rocha-tamayo, A., García-troncoso, N., Baykara, H., & Cornejo, M. H. (2022). Preparation, Characterization, and Life Cycle Assessment of Aerated Concrete Blocks: A Case Study in Guayaquil City, Ecuador. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/app12041913>
- Rodríguez-Díaz, P. D., Angumba-Aguilar, P., & Romo-Zamudio, C. (2023). Importancia de la construcción sustentable en el desarrollo de emprendimientos turísticos comunales. Caso de estudio Turi. *MQRInvestigar*, 7(3), 402–431. <https://doi.org/10.56048/mqr20225.7.3.2023.402-431>
- Rosa, L. V., & Haddad, A. N. (2013). Building sustainability assessment throughout multi-criteria decision making. *Construction Engineering*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2013/578671>
- Tello-Ayala, K., Garcia-Troncoso, N., Silva, C. E., Zúñiga-Olvera, C., Narvaez-Moran, J., Malaga-Chuquitaype, C., & Mouka, T. (2023). Comparative analysis of the sustainability and seismic performance of a social interest house using RC moment frames and bahareque as structural systems. *Frontiers in Built Environment*, 9(July), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1150826>
- Tello-Ayala, K., & Narvaez-Moran, J. (2022). *Análisis comparativo del desempeño sísmico de una vivienda de interés social de bahareque y hormigón armado en la ciudad de Guayaquil*.
- Torres Álava, F., Guerrero, F., Varas Maenza, C., & Solis Barros, T. (2022). *Circular economy vision for local development focused on waste derived from two agricultural crops in Ecuador*.
- Torres, W. (2021). El déficit de vivienda alcanza a 2,7 millones de unidades, según Miduvi. In *Primicias* (p. 1).
- Tran, D. B., Tran, V. T., Pham, X. A., & Nguyen, V. T. (2023). A General Framework for Sustainability Assessment of Buildings: A Life-Cycle Thinking Approach. *Sustainability (Switzerland)*, 15(14). <https://doi.org/10.3390/su151410770>
- UNFPA. (2023). Informe sobre el Estado de la Población Mundial 2023. In *Unfpa*. <https://www.unfpa.org/sites/default/files/swop23/SWOP2023-SPANISH-230403-web.pdf>
- United Nations. (2023). The Sustainable Development Goals Report. In *The Sustainable development Goals Report 2023: Special Edition*. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/>

- USAID. (n.d.). *Estudio exploratorio del mercado de caña guadúa Pact Ecuador-1*.
- Xi, B., Zhang, N., Duan, H., He, J., Song, G., Li, H., & Shi, X. (2023). Optimization of rice husk ash concrete design towards economic and environmental assessment. *Environmental Impact Assessment Review*. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107229>
- Zajemska, M., Wojtyto, D., Michalik, J., & Berski, S. (2025). Review of Current Trends in Sustainable Construction. In *Energies* (Vol. 18, Issue 10). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/en18102559>
- Zepeda-Gil, C., & Natarajan, S. (2020). A review of “green building” regulations, laws, and standards in Latin America. In *Buildings* (Vol. 10, Issue 10, pp. 1–28). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/buildings10100188>

Apéndice A

1. Funciones de valor

Figura A 1. Funciones de valor de cada indicador



Apéndice B

2. Presupuestos

Figura B 1. Presupuesto para vivienda de Bahareque

ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
A	OBRAS PRELIMINARES				\$ 420,32
1	Limpieza de terreno	m2	470,00	\$ 0,62	\$ 289,50
2	Replanteo de estructuras	m2	51,96	\$ 0,51	\$ 26,33
3	Trazado de paredes	m2	103,92	\$ 1,01	\$ 104,49
B	MOVIMIENTOS DE TIERRA				\$ 218,84
4	Excavación manual para estructuras	m3	26,04	\$ 8,40	\$ 218,84
C	CIMENTACIÓN				\$ 4.112,32
5	Replanteo de H.S. $f'c = 140 \text{ kg/cm}^2$ ($e = 0.05$)	m2	51,96	\$ 7,81	\$ 405,70
6	Hormigón estructural de Zapatas y dados (inc encofrado)	m3	4,88	\$ 218,76	\$ 1.067,55
7	Acero de refuerzo $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$	kg	395,38	\$ 1,74	\$ 688,85
8	Sobrecimiento de bloque	ml	44,33	\$ 2,24	\$ 99,13
9	Contrapiso de H.A. $e = 0.1$ (inc compactación de terreno)	m2	51,21	\$ 36,15	\$ 1.851,09
D	COMPONENTES ESTRUCTURALES				\$ 1.850,21
10	Columnas de caña Guadua 4C4F	ml	12,00	\$ 7,79	\$ 93,50
11	Vigas de caña Guadua 2C3F	ml	9,21	\$ 10,63	\$ 97,91
12	Vigas de caña Guadua 1C3F	ml	25,59	\$ 6,82	\$ 174,47
13	Vigas de caña Guadua 1C2F	ml	19,93	\$ 5,56	\$ 110,77
14	Arriostramientos de caña Guadua 1C1F	ml	84,56	\$ 4,30	\$ 363,48
15	Entrepiso de caña chancada revestido de concreto	m2	51,96	\$ 19,44	\$ 1.010,07
E	CUBIERTA				\$ 1.058,37
16	Correas de caña Guadua	ml	96,76	\$ 4,30	\$ 415,90
17	Cubiertas con fibrocemento	m2	70,02	\$ 9,18	\$ 642,47
F	INDIRECTOS				\$ 828,68
18	IMPREVISTOS (1% CD)	g/lb	1,00	\$ 76,60	\$ 76,60
19	DISEÑOS	m2	51,96	\$ 13,00	\$ 675,48
20	PÓLIZAS Y SEGUROS (1% CD)	g/lb	1,00	\$ 76,60	\$ 76,60
TOTAL COSTO DIRECTO				\$	7.660,06
COSTO INDIRECTO				\$	828,68
COSTO TOTAL				\$	8.488,74

Figura B 2. Presupuesto para vivienda de Concreto armado

ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
A	OBRAS PRELIMINARES				\$ 420,32
1	Limpieza de terreno	m2	470,00	\$ 0,62	\$ 289,50
2	Replanteo de estructuras	m2	51,96	\$ 0,51	\$ 26,33
3	Trazado de paredes	m2	103,92	\$ 1,01	\$ 104,49
B	MOVIMIENTOS DE TIERRA				\$ 218,84
4	Excavación manual para estructuras	m3	26,04	\$ 8,40	\$ 218,84
C	ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO				\$ 9.581,01
5	Replanteo de H.S. $f'c = 140 \text{ kg/cm}^2$ ($e = 0.05$)	m2	51,96	\$ 7,81	\$ 405,70
6	Hormigón estructural de Riostras (inc encofrado)	m3	1,06	\$ 215,09	\$ 227,99
7	Hormigón estructural de Zapatas (inc encofrado)	m3	4,38	\$ 218,76	\$ 958,17
8	Hormigón estructural de Pilares (inc encofrado)	m3	4,40	\$ 297,64	\$ 1.309,61
9	Hormigón estructural de Vigas (inc encofrado)	m3	2,24	\$ 277,64	\$ 621,91
10	Hormigón estructural de Losas y Nervios (inc encofrado)	m3	2,80	\$ 268,35	\$ 751,38
11	Hormigón estructural de Escaleras (inc encofrado)	m3	0,69	\$ 273,18	\$ 188,49
12	Acero de refuerzo $f'y=4200 \text{ kg/cm}^2$	kg	1.711,84	\$ 1,74	\$ 2.982,46
13	Contrapiso de H.A. $e=0.1$ (inc compactación de terreno)	m2	51,21	\$ 41,70	\$ 2.135,29
D	CUBIERTA				\$ 1.825,27
14	Acero estructural A36	kg	392,50	\$ 2,13	\$ 834,16
15	Suministro e instalación de fibrocemento	m2	70,02	\$ 14,15	\$ 991,11
E	INDIRECTOS				\$ 864,43
16	IMPREVISTOS (1% CD)	glb	1,00	\$ 120,45	\$ 120,45
17	DISEÑOS	m2	51,96	\$ 12,00	\$ 623,52
18	PÓLIZAS Y SEGUROS (1% CD)	glb	1,00	\$ 120,45	\$ 120,45

TOTAL COSTO DIRECTO	\$ 12.045,44
COSTO INDIRECTO	\$ 864,43
COSTO TOTAL	\$ 12.909,87