RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Andrés Mauricio Arciniegas Gamero
FACULTAD	Facultad de ingeniería
PLAN DE ESTUDIOS	Maestría en construcción
DIRECTOR	Mgtr. Carlos Alexis Bonilla Granados Mgtr. María Angélica Bayona Álvarez
TÍTULO DE LA TESIS	Análisis Documental De Los Criterios Para La Construcción De Viviendas Autosostenibles, Integrando Nuevas Tecnologías Y Buenas Prácticas Ambientales
TITULO EN INGLES	Documentary Analysis Of The Criteria For The Construction Of Self-Sustainable Housing, Integrating New Technologies And Good Environmental Practices

RESUMEN
(70 palabras)

Este estudio busca abordar los urgentes desafíos que enfrenta la industria de la construcción en países en desarrollo como Colombia a través de un enfoque estructurado y sistemático. Al adoptar un enfoque de investigación cualitativa dentro del paradigma epistemológico constructivista, esta investigación tiene como objetivo establecer un marco que aclare la agenda de desarrollo de la industria de la construcción.

RESUMEN EN INGLES

This study seeks to address the urgent challenges facing the construction industry in developing countries such as Colombia through a structured and systematic approach. By adopting a qualitative research approach within the constructivist epistemological paradigm, this research aims to establish a framework that clarifies the development agenda of the construction industry.

PALABRAS CLAVES	Construcción, Viviendas Autosostenibles, Tecnologías, Buenas Prácticas.
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Construction, Self-Sustainable Housing, Technologies, Best Practices.

CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 179	PLANOS:	ILUSTRACIONES:	CD-ROM:

Análisis Documental De Los Criterios Para La Construcción De Viviendas Autosostenibles, Integrando Nuevas Tecnologías Y Buenas Prácticas Ambientales

Andrés Mauricio Arciniegas Gamero

Facultad De Ingeniería, Universidad Francisco De Paula Santander Ocaña

Maestría En Construcción

Mgtr. Carlos Alexis Bonilla Granados

Mgtr. María Angélica Bayona Álvarez

20 Agosto, 2024

Contenido

Capítulo 1. Análisis Documental De Los Criterios Para La Construcción De Viviendas Autosostenibles, Integrando Nuevas Tecnologías Y Buenas Prácticas Ambientales. 11

1.1. Planteamiento del Problema 11

1.2. Formulación del Problema 14

1.3. Objetivos de Investigación 14

1.3.1. Objetivo General 14

1.3.2. Objetivos Especifico 15

1.4. Justificación 16

1.5. Delimitaciones 18

1.5.1. Delimitación Geográfica 18

1.5.2. Delimitación Temporal 18

1.5.3. Delimitación Conceptual 18

1.5.4. Delimitación Operativa 19

Capítulo 2. Marco Referencial 20

2.1 Marco Histórico 20

2.2 Marco Contextual 23

2.3 Marco Conceptual 26

2.3.1 Construcción sostenible 26

2.3.2 Viviendas autosostenibles 28

2.3.3 Sellos de construcción sostenible 30

2.3.4 Tecnologías limpias en la construcción 32

2.4 Marco Teórico 35

2.4.1 Tecnologías sostenibles 38

2.4.2 Construcciones de bajo carbono 40

2.5 Marco Legal 42

2.5.1 Contexto internacional 42

2.5.2 Contexto nacional 44

Capítulo 3. Diseño Metodológico 51

3.1 Tipo de investigación 51

3.2 Seguimiento metodológico del proyecto 52

3.3 Población 53

3.4 Muestra 55

3.5 Técnicas de recolección y análisis de la información 55

3.5.1 Criterios para la evaluación de la implementación de criterios de construcción sostenible 56

Capítulo 4. Resultados 60

4.1 Analizar la literatura científica y técnica disponible sobre los criterios y principios claves para la construcción de viviendas autosostenibles, enfocándose en la integración de tecnologías innovadoras y buenas prácticas ambientales..... 60

4.1.1 Frecuencia del número de artículos publicados por año..... 60

4.1.2 Frecuencia de las principales áreas de las revistas..... 64

4.1.3 Análisis de palabras clave y análisis de las principales regiones de las instituciones 67

4.1.4 Perspectivas sociales de la construcción sostenible..... 71

4.2 Identificar las tecnologías y materiales más relevantes para la construcción sostenible y determinar cómo pueden ser aplicados de manera efectiva en el contexto de países en desarrollo, tomando como estudio de caso el contexto colombiano..... 82

4.2.1 Contexto..... 82

4.2.2 Tecnologías sostenibles en la construcción. 84

4.2.3 Construcción baja en carbono..... 92

4.2.4 Tecnologías limpias en la construcción..... 98

4.2.5 Aplicabilidad en el contexto colombiano 102

4.2.6 Desafíos de la construcción de viviendas sostenibles..... 104

4.3 Evaluar el impacto potencial de la implementación de criterios de construcción sostenible en términos de reducción de consumo de recursos naturales, emisiones de CO2 y consumo energético en el ciclo de vida de las viviendas construidas bajo estos estándares en países en desarrollo, específicamente en Colombia..... 106

4.3.1 Evaluación de la implementación de criterios de construcción sostenible . 109

4.4 Elaborar una guía con recomendaciones específicas y aplicables para la construcción de viviendas autosostenibles en Colombia, integrando nuevas tecnologías y buenas prácticas ambientales para la promoción de un desarrollo urbano amigable con el entorno ambiental y social. 132

4.4.1 Recomendaciones constructivas para el uso de materiales locales y reciclados 133

4.4.2 Recomendaciones constructivas para el uso de energías renovables..... 139

4.4.3 Recomendaciones constructivas para el uso de tecnologías de eficiencia energética 144

4.4.4 Recomendaciones constructivas para el uso tecnologías de agua sostenible 148

4.4.5 Recomendaciones constructivas para el uso de construcción prefabricada 151

4.4.6 Recomendaciones constructivas para el uso de tecnologías digitales y de información 153

5. Conclusiones 157

Referencias 160

Lista de Figuras

Figura 1 Estructura metodológica del proyecto 54

Figura 2 Numero de Publicaciones entre 2013 y 2023. 61

Figura 3 Revistas con mayor número de publicaciones sobre el tema de estudio entre 2013. ... 65

Figura 4 Áreas de investigación. 66

Figura 5 Red de co-ocurrencia de palabras clave. 69

Figura 6 Resultados de las matrices de evaluación 129

Figura 7 Vivienda con sistema constructivo en guadua 133

Figura 8 Cemento y puzolanas 135

Figura 9 Aislamiento termino en fibra de coco 137

Figura 10 Paneles solares en viviendas 140

Figura 11 Sistema de calentamiento de agua sostenible 142

Figura 12 Iluminación LED de viviendas 144

Figura 13 Diseño bioclimático de viviendas 146

Figura 14 Sistema de captación de agua lluvia 148

Figura 15 Reutilización y aprovechamiento de aguas grises 150

Figura 16 Sistema constructivo de prefabricados 152

Figura 17 Conceptualización BIM 154

Figura 18 Monitoreo y gestión inteligente de viviendas 155

Lista de Tablas

Tabla 1 Modelo Metodológico..... 53

Tabla 2 Matriz de evaluación de materiales sostenibles..... 113

Tabla 3 Matriz de evaluación de energía renovable 115

Tabla 4 Matriz de evaluación de tecnologías de eficiencia energética..... 118

Tabla 5 Matriz de evaluación de disponibilidad de agua sostenible..... 121

Tabla 6 Matriz de evaluación de construcción prefabricada 124

Tabla 7 Matriz de evaluación de tecnologías digitales y de información..... 127

Introducción

En la búsqueda del desarrollo sostenible, la industria de la construcción se erige como una frontera crítica donde convergen los desafíos de impacto ambiental y sostenibilidad (Betancourt et al., 2021; Werner, 2013; Xiao et al., 2016). Con su amplio consumo de recursos y demandas energéticas sustanciales, el sector de la construcción emerge como un contribuyente significativo a la degradación ambiental global. Las repercusiones de estas prácticas son perdurables, con estructuras que ejercen sus efectos en el medio ambiente durante décadas (Enshassi et al., 2018; Jiménez-Expósito et al., 2023).

La investigación reciente subraya las alarmantes estadísticas en torno al costo ambiental de las actividades de construcción. (Cascone et al., 2021a) destaca la designación de la industria como uno de los sectores más perjudiciales para el medio ambiente a nivel mundial. Además, la naturaleza perdurable de los edificios construidos perpetúa estas consecuencias ambientales a largo plazo (Mendonça & Bragança, 2007). Sorprendentemente, el sector de la construcción representa más del 50% de la extracción mundial de materias primas y genera entre el 25 y el 33% de todos los desechos, mientras emite los niveles más altos de dióxido de carbono entre las industrias y es responsable del 40% de los desechos globales (Lima et al., 2021).

Esta realidad subraya la necesidad urgente de una acción transformadora dentro de la industria de la construcción. Sin embargo, realizar tal cambio no está exento de desafíos. (Coma Bassas et al., 2020) argumentan que la industria de la construcción enfrenta obstáculos multifacéticos en diversos contextos de desarrollo. Estos desafíos, que van desde la baja

productividad hasta problemas de gobernanza, obstaculizan el progreso hacia prácticas de construcción sostenible.

Dentro del panorama de desarrollo de países como Colombia, donde una parte significativa del consumo de energía se atribuye a los edificios, la imperativa de soluciones de vivienda sostenible se vuelve aún más pronunciada. (Calderon, 2019)estima que una vivienda unifamiliar en Colombia consume una cantidad sustancial de energía a lo largo de su vida útil, lo que hace necesario un cambio de paradigma hacia prácticas de vivienda sostenible.

Reconociendo estos desafíos, los profesionales del sector de la construcción son cada vez más llamados a integrar principios de sostenibilidad en sus proyectos (Fosterharoldas Swasto, 2018; Galford & Tucker, 2021; Moore & Doyon, 2023; Valibeigi et al., 2019). El objetivo es doble: proporcionar espacios habitables que satisfagan las necesidades humanas mientras se protege el medio ambiente natural (Lee et al., 2013; Patnaikuni et al., 2013). Lograr este delicado equilibrio requiere una comprensión integral de las técnicas, sistemas y materiales de construcción sostenible (Akinwumi, 2014; Ding, 2013), junto con prácticas de diseño y construcción que minimicen el impacto ambiental y maximicen la eficiencia energética (Kabir et al., 2018; Roufechaei et al., 2014).

Este estudio busca abordar los urgentes desafíos que enfrenta la industria de la construcción en países en desarrollo como Colombia a través de un enfoque estructurado y sistemático. Al adoptar un enfoque de investigación cualitativa dentro del paradigma epistemológico constructivista, esta investigación tiene como objetivo establecer un marco que

aclare la agenda de desarrollo de la industria de la construcción. A través de una revisión integradora de la literatura, este artículo se esfuerza por delinear las características esenciales de la construcción sostenible y contextualizarlas dentro de los desafíos sistémicos que enfrenta la industria.

Capítulo 1. Análisis Documental De Los Criterios Para La Construcción De Viviendas Autosostenibles, Integrando Nuevas Tecnologías Y Buenas Prácticas Ambientales.

1.1. Planteamiento del Problema

El sector de la construcción a nivel global presenta una problemática significativa en términos de su impacto ambiental y su sostenibilidad. Esta industria se posiciona como una de las más perjudiciales para el medio ambiente (Cascone et al., 2021). Además, se destaca que los recursos consumidos y los requerimientos energéticos de los edificios tienen una duración prolongada en el tiempo, lo que puede acarrear consecuencias negativas durante décadas (Mendonça & Bragança, 2007). El sector de la construcción consume más del 50 % de toda la materia prima extraída a nivel mundial y produce entre el 25 y el 33 % de los residuos, emite el mayor nivel de carbono por sector y es responsable del 40 % de los residuos globales (Lima et al, 2021).

El desarrollo de la industria de la construcción hace parte de la agenda global de los países con diversos niveles de desarrollo, pudiendo identificar diversos desafíos que enfrenta dicha industria (Kumar et al., 2023). Según Gyadu-Asiedu, la mayoría de los problemas que obstaculizan el logro del efecto deseado en la industria de la construcción de cualquier país están relacionados con los desafíos en la ejecución de proyectos. Los problemas comunes de baja productividad, retrasos y sobrecostos han sido investigados ampliamente con resultados muy similares (Tawfeeq et al., 2021). Tras varios años de trabajos relacionados con la industria de la construcción en países en desarrollo, el Consejo Internacional de Investigación e Innovación para

la Edificación y la Construcción (CIB) identificó los siguientes desafíos principales que enfrenta la industria de la construcción en países en desarrollo:

- La necesidad de un nuevo modelo de desarrollo,
- Vínculos entre el desarrollo urbano y rural,
- La necesidad de viviendas sostenibles,
- Educación sostenible,
- Construcción sostenible a través de materiales y métodos de construcción innovadores,
- Tecnologías autóctonas en la era moderna,
- Cerrar la brecha de género,
- Financiamiento y sistemas de entrega adecuados,
- Cuestiones de gobernanza y gestión en toda la industria,
- Sistemas de adquisición adecuados,
- Gestión de proyectos
- Acceso para empresas locales.

Estos y otros desafíos han obstaculizado el progreso hacia la agenda de desarrollo de la industria de la construcción en muchos países en desarrollo (Adabre & Chan, 2020).

En el contexto colombiano, se estima que alrededor del 25% de la energía anual del país es consumida por edificios. Tomando una perspectiva más específica, se calcula que una vivienda unifamiliar en Colombia consume alrededor de 329 kilovatios por mes, lo que suma aproximadamente 3,948 kilovatios al año. Esta cifra acumulativa se traduce en un consumo energético total de 78,960 kilovatios durante la vida útil estimada de la vivienda, que se estima en alrededor de 20 años (Rangel, 2019).

Los profesionales del sector enfrentan un desafío significativo al incorporar el concepto de vivienda sostenible en los futuros proyectos de infraestructura. El propósito fundamental de este esfuerzo es mantener la integridad del entorno natural mientras se proporciona un ambiente habitable de alta calidad para los residentes. Al lograr un equilibrio entre estos objetivos, se busca satisfacer las necesidades fundamentales de los habitantes y al mismo tiempo contribuir a la conservación del medio ambiente (Susunaga Monroy, 2014).

En este contexto, es esencial identificar y comprender las características esenciales de las técnicas, sistemas y materiales que respaldan la construcción sostenible (Flores & Merma Gallardo, 2022). Esto involucra evaluar cómo se pueden aplicar prácticas de diseño y construcción que minimicen el impacto ambiental, maximicen la eficiencia energética y promuevan la sostenibilidad a largo plazo (Carmona et al., 2023).

El desarrollo de la industria de la construcción en países en desarrollo se enfrenta a una serie de desafíos, los cuales son diversos y numerosos (Adabre & Chan, 2020). El propósito de

este trabajo de grado es establecer un marco mediante el cual se pueda abordar la agenda de desarrollo de la industria de la construcción en países en desarrollo como Colombia, a través de un enfoque más estructurado y sistemático. Para llevar a cabo este estudio, se adoptará un enfoque de investigación cualitativa dentro del paradigma epistemológico constructivista. En cuanto a la recopilación de información, se empleará un enfoque de revisión integradora de la literatura para esclarecer la naturaleza de la industria de la construcción y su contexto sistémico adecuado.

1.2.Formulación del Problema

Pregunta base o indagatoria:

¿Cuáles son los criterios fundamentales para la construcción de viviendas autosostenibles, integrando nuevas tecnologías y buenas prácticas ambientales, y cómo pueden ser aplicados de manera efectiva en el contexto de países en desarrollo, con un enfoque especial en el contexto colombiano?

1.3.Objetivos de Investigación

1.3.1. Objetivo General

Analizar los criterios para la construcción de viviendas autosostenibles, incorporando nuevas tecnologías y buenas prácticas ambientales, para promover el desarrollo sostenible en el sector de la construcción en países en desarrollo con énfasis en el contexto colombiano.

1.3.2. Objetivos Especifico

- Analizar la literatura científica y técnica disponible sobre los criterios y principios claves para la construcción de viviendas autosostenibles, enfocándose en la integración de tecnologías innovadoras y buenas prácticas ambientales.

- Identificar las tecnologías y materiales más relevantes para la construcción sostenible y determinar cómo pueden ser aplicados de manera efectiva en el contexto de países en desarrollo, tomando como estudio de caso el contexto colombiano.

- Evaluar el impacto potencial de la implementación de criterios de construcción sostenible en términos de reducción de consumo de recursos naturales, emisiones de CO2 y consumo energético en el ciclo de vida de las viviendas construidas bajo estos estándares en países en desarrollo, específicamente en Colombia.

- Elaborar una guía con recomendaciones específicas y aplicables para la construcción de viviendas autosostenibles en Colombia, integrando nuevas tecnologías y buenas prácticas ambientales para la promoción de un desarrollo urbano amigable con el entorno ambiental y social.

1.4.Justificación

En La investigación planteada aborda de manera exhaustiva la necesidad imperante de desarrollar soluciones habitacionales que no solo satisfagan las necesidades de la población, sino que también minimicen el impacto ambiental y promuevan la resiliencia de las comunidades. En un contexto global de urbanización acelerada y cambio climático, esta investigación emerge como una respuesta crucial ante los desafíos ambientales y socioeconómicos contemporáneos (Shi & Zhou, 2012).

El estudio se basa en un enfoque multidisciplinario que combina la revisión sistemática y el análisis documental. Se lleva a cabo una selección rigurosa de fuentes pertinentes, incluyendo estudios académicos, informes técnicos, normativas vigentes y casos de estudio relevantes a nivel global y, especialmente, en el contexto colombiano. Esto asegura la obtención de una visión actualizada de las innovaciones más relevantes y su potencial aplicabilidad en la construcción de viviendas autosostenibles.

La relevancia de esta investigación se evidencia especialmente en el contexto de países en desarrollo, como Colombia, donde existe una creciente necesidad de abordar la vivienda desde una perspectiva sostenible que garantice la adecuada gestión de recursos y la reducción de impactos ambientales negativos. La identificación y comprensión de los criterios fundamentales para la construcción de viviendas autosostenibles permitirá establecer pautas claras y viables para el diseño y desarrollo de proyectos habitacionales en este contexto (Rangel, 2019).

Además, al enfocarse en la integración de nuevas tecnologías y buenas prácticas ambientales en la construcción sostenible, esta investigación contribuye a un campo en constante evolución. Los avances significativos merecen ser analizados y aplicados de manera efectiva, lo cual se logra mediante este estudio que proporciona un marco actualizado y completo. Actualmente, se está impulsando la integración de principios de sostenibilidad en las viviendas. El enfoque central es la reducción de la utilización de recursos naturales, lo cual, según las estimaciones, podría resultar en una disminución de hasta un 35% en las emisiones de CO2 y un 50% en el consumo energético. Este objetivo se alinea con la creciente conciencia global sobre la importancia de mitigar el impacto ambiental y promover prácticas más responsables en el sector de la construcción (Castro et al, 2021).

En última instancia, esta investigación beneficiará a diversos actores involucrados en el ámbito de la construcción y el desarrollo urbano sostenible. Profesionales del sector, autoridades gubernamentales, organizaciones no gubernamentales, académicos y la sociedad en general se verán beneficiados al contar con un marco claro y actualizado de criterios para la construcción de viviendas autosostenibles. Esto contribuirá a la promoción de un desarrollo urbano más equitativo, resiliente y ambientalmente responsable en Colombia y otros contextos similares a nivel global.

1.5.Delimitaciones

1.5.1. Delimitación Geográfica

El proyecto se desarrollará principalmente en el contexto de países en desarrollo, con una atención especial en el caso colombiano. Aunque se pueden extrapolar algunos hallazgos a otros países en desarrollo, las recomendaciones estarán más directamente relacionadas con las condiciones y regulaciones específicas de Colombia.

1.5.2. Delimitación Temporal

La investigación se basará en datos y literatura disponibles hasta 2023. Considerando las tendencias y tecnologías emergentes que hayan surgido hasta el momento de la recopilación de información.

1.5.3. Delimitación Conceptual

La investigación estará enfocada específicamente en los criterios y prácticas para la construcción de viviendas autosostenibles, con énfasis en la integración de nuevas tecnologías y buenas prácticas ambientales.

1.5.4. Delimitación Operativa

En el ámbito operativo, este proyecto se centrará en la recopilación y análisis de información a partir de fuentes bibliográficas y documentales disponibles en bibliotecas, bases de datos especializadas y recursos en línea.

Capítulo 2. Marco Referencial

2.1 Marco Histórico

La construcción sostenible ha experimentado un rápido crecimiento global, impulsada por la conciencia sobre la reducción de recursos. A pesar de su papel crucial en mejorar la calidad de vida, la industria de la construcción contribuye significativamente a las emisiones de CO2 y generación de residuos (Nebrida & Gomba, 2023). La sostenibilidad en la construcción civil se vuelve imperativa, ya que las organizaciones buscan una ventaja competitiva basada en la satisfacción del cliente y la responsabilidad ambiental. La revisión sistemática de la literatura realizada con este trabajo de grado destaca la evolución del tema, las metodologías utilizadas para evaluar impactos ambientales, el uso de certificaciones y los enfoques adoptados por la comunidad científica. La sostenibilidad en la construcción se presenta como un aspecto integral para el éxito y la responsabilidad social de las organizaciones en este sector (Cudzik & Atasoy, 2023).

A partir de la revisión de la literatura, se identificaron algunos documentos relevantes para el análisis desarrollado, como es el caso de Carlucci et al. (2018), quienes identificaron las principales fuentes de incertidumbre en la literatura con respecto a modelos de confort térmico adaptativo en entornos construidos que utilizan documentación regular aplicada a diferentes zonas climáticas. Como resultado, varios modelos de confort térmico adaptativo se han integrado en documentos normativos nacionales y globales para elaborar edificaciones con tasas de consumo de energía más bajas. Asi mismo, Díaz Lozano Patino y Siegel (2018) presentaron una

revisión de 49 artículos sobre condiciones de calidad ambiental interna en viviendas sociales. Su objetivo fue determinar las concentraciones de contaminantes atmosféricos, el confort térmico y los posibles efectos en la salud en estas viviendas, haciendo referencia a la sostenibilidad. Este trabajo abordó el pilar social, centrándose en la población de bajos ingresos, edificaciones con varias unidades, presencia significativa de minorías y/o personas mayores, y el uso de subsidios de alquiler, realizando un análisis de mejoras para esta población (Qian et al., 2023).

Otros autores como Ma et al. (2018) analizaron documentos relacionados con las dimensiones de las perspectivas humanas sobre el ruido. Dado que las personas pasan muchas horas en edificios, era importante investigar las influencias acústicas. Su estudio también proporcionó nuevos conocimientos para comprender las interacciones humano-ambientales y nuevas alternativas para futuros proyectos de construcción; comprender las dimensiones perceptivas humanas del sonido es esencial para la gestión ambiental acústica, ya que promueve la predicción de propiedades de sonido objetivas para respuestas subjetivas.

La sostenibilidad en la industria de la construcción puede ayudar a satisfacer las necesidades de las generaciones presentes y futuras al conservar energía, agua y recursos naturales mediante la reutilización, el reciclaje, el diseño innovador y la minimización de residuos y contaminación. Para lograrlo, se toman medidas proactivas para revertir o minimizar los impactos negativos que las actividades de construcción tienen en el medio ambiente (Aigbavboa et al., 2017).

En el contexto colombiano, se evidencia una falta de enfoque integral en las políticas de vivienda. La llamada "política de vivienda" se ha centrado principalmente en abordar el déficit habitacional, limitándose a soluciones arquitectónicas sin considerar aspectos multidimensionales. Las propuestas de vivienda sostenible son escasas y se han desarrollado principalmente en áreas rurales, impulsadas por iniciativas privadas y proyectos de estratos altos que buscan certificaciones LEED para destacarse en el competitivo mercado inmobiliario (Qian et al., 2023).

A pesar de estos esfuerzos, se observa una necesidad urgente de cambiar el paradigma respecto a la vivienda. La vivienda no debe ser vista simplemente como una entidad arquitectónica, sino como un componente integral del entorno urbano, que requiere consideraciones sistémicas para abordar factores ambientales, sociales y de movilidad. Superar los límites de las políticas actuales y generar instrumentos concretos son pasos esenciales para impulsar transformaciones significativas en el desarrollo humano (Rodríguez-Jiménez et al., 2018).

En cuanto a los referentes conceptuales de orden internacional, se destaca la importancia de adoptar un enfoque sistémico para abordar la sostenibilidad urbana. La Cumbre de la Tierra y el Informe Brundtland enfatizan la interrelación entre desarrollo económico, bienestar social y conservación de recursos naturales. La definición de construcción sostenible propuesta en 1992 amplía esta perspectiva, considerando todo el ciclo de vida de las edificaciones y su impacto en el entorno construido.

Las diferentes corrientes de pensamiento, desde la arquitectura ecológica hasta la arquitectura bioclimática, han contribuido con principios que buscan integrar la construcción con el entorno de manera más armoniosa y eficiente. La eficiencia en el uso de recursos, el respeto al entorno natural y la consideración de factores climáticos son elementos recurrentes en estos conceptos (Oke et al., 2023).

En este sentido, tanto a nivel nacional como internacional, la sostenibilidad en la vivienda y la construcción ha evolucionado desde un enfoque exclusivamente arquitectónico hacia una comprensión más integral. Sin embargo, persisten desafíos en la implementación efectiva de políticas que aborden las dimensiones ambientales, sociales y económicas de manera equitativa y eficiente. La adopción de un enfoque sistémico se presenta como una necesidad para lograr avances significativos hacia un desarrollo sostenible en el ámbito de la vivienda.

2.2 Marco Contextual

La evolución histórica de la vivienda en Colombia revela una marcada preeminencia de criterios, tanto en la elección de ubicaciones como en el diseño arquitectónico. En este contexto, la vivienda ha sido conceptualizada principalmente como un fenómeno arquitectónico, donde la calidad se ha evaluado en función de consideraciones físicas y espaciales, mientras que el análisis de su relación con el entorno y el contexto sociocultural ha sido subestimado.

En este escenario, resulta pertinente examinar las políticas públicas en Colombia relacionadas con la vivienda, destacando similitudes y divergencias en sus enfoques. La Constitución Política de 1991 establece el derecho a una vivienda digna, resaltando elementos como espacio, comodidad, servicios públicos, durabilidad, seguridad, esparcimiento y calidad de vida. No obstante, la implementación de estas directrices ha enfrentado obstáculos, evidenciando la necesidad de mecanismos más concretos para materializar estas aspiraciones (Maldonado-Pinto, 2022).

La Política de gestión ambiental urbana, formulada en 2008, busca establecer directrices para el manejo sostenible de áreas urbanas. Aunque enfoca aspectos clave como vivienda, espacio público, transporte urbano, recurso hídrico, servicios públicos y residuos, su limitación a áreas urbanas excluye consideraciones relevantes para la sostenibilidad en zonas rurales y urbanorurales.

En 2010, surge la Política de producción y consumo sostenible, aparentemente desvinculada de la vivienda y la ciudad. Sin embargo, su valor radica en la comprensión de los problemas de insostenibilidad ligados a las actividades productivas, abordando la sostenibilidad desde una perspectiva de sectores productivos y demanda, con especial énfasis en el ciclo de vida (Rodríguez-Jiménez et al., 2018).

La Política pública de urbanismo y construcción sostenible, concebida en 2014 y perfeccionada en 2015 con el Decreto 1285, presenta un enfoque integral, considerando factores

como suelo urbano, transporte, movilidad, servicios públicos, vías, espacio público, viviendas de interés social (VIS), edificaciones públicas y privadas. Sin embargo, la reglamentación posterior del decreto limita algunos aspectos multidimensionales propuestos en la política inicial.

Frente a la problemática habitacional, la denominada "política de vivienda" ha sido conceptualizada como una solución arquitectónica, abordando únicamente el déficit habitacional. Esta perspectiva estrecha impide una visión integral, ya que la calidad de la vivienda está intrínsecamente vinculada al entorno urbano y a la satisfacción de diversas necesidades sociales, ambientales y de movilidad.

En el contexto colombiano, son escasos los ejemplos de propuestas de vivienda sostenible, y estas se han desarrollado principalmente en zonas rurales. Iniciativas privadas y proyectos de estratos altos que buscan certificaciones LEED han surgido como respuesta a un mercado inmobiliario competitivo, donde la construcción sostenible agrega valor y estatus a la vivienda (Garzón & Sánchez-Soto, 2013).

En última instancia, para lograr un desarrollo sostenible en el ámbito de la vivienda, se propone un cambio de paradigma que trascienda la visión tradicional de la vivienda como una entidad puramente arquitectónica. Es esencial entender la vivienda en relación con su entorno, considerando factores sistémicos que abarquen el entorno urbano, la ciudad y el territorio. Asimismo, se destaca la importancia de superar los límites de las políticas actuales y generar

instrumentos concretos que impulsen transformaciones significativas en el desarrollo humano de la población.

2.3 Marco Conceptual

2.3.1 Construcción sostenible

La construcción sostenible es un enfoque holístico e integrado para el diseño, construcción y gestión de edificaciones que busca minimizar el impacto ambiental, promover la eficiencia en el uso de recursos y fomentar la responsabilidad social y económica a lo largo de todo el ciclo de vida de una estructura. También se conoce como construcción verde o construcción ecológica. Los principios fundamentales de la construcción sostenible involucran la incorporación de prácticas y tecnologías que reduzcan la huella ambiental de los edificios, promuevan la eficiencia energética, utilicen materiales renovables y reciclados, mejoren la calidad del aire interior, minimicen los residuos de construcción y favorezcan la adaptación al entorno circundante (Flores & Merma Gallardo, 2022).

Algunos elementos clave de la construcción sostenible incluyen:

Eficiencia energética: Que consisten la integración de tecnologías y prácticas que reduzcan el consumo de energía, como la instalación de aislamiento eficiente, sistemas de iluminación y climatización de bajo consumo, y el uso de energías renovables.

Selección de materiales sostenibles: Que comprende la utilización de materiales de construcción provenientes de fuentes renovables, recicladas o locales, con énfasis en la reducción de emisiones de carbono asociadas a su extracción, fabricación y transporte.

Gestión del agua: Implementación de estrategias para la conservación del agua, como sistemas de recolección de aguas pluviales, instalación de dispositivos de bajo consumo y diseño de paisajismo que minimice la necesidad de riego.

Calidad del aire interior: Utilización de materiales y sistemas que mejoren la calidad del aire en el interior de los edificios, reduciendo la presencia de compuestos orgánicos volátiles (COV) y promoviendo la circulación de aire fresco.

Gestión de residuos: Reducción de residuos de construcción y demolición mediante prácticas como el reciclaje y la reutilización de materiales, y la adopción de métodos constructivos que minimicen los desechos generados.

Diseño orientado al entorno: Consideración del entorno circundante en el diseño arquitectónico para maximizar la eficiencia energética y aprovechar las características naturales del sitio, como la luz solar y la ventilación.

Innovación y tecnología: Integración de tecnologías innovadoras que contribuyan a la sostenibilidad, como sistemas de automatización para la gestión eficiente de la energía y el monitoreo del rendimiento ambiental de los edificios.

En este sentido, la construcción sostenible busca equilibrar las necesidades presentes con la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades, promoviendo la armonía entre el desarrollo humano y la salud del planeta. Este enfoque busca no solo minimizar los impactos negativos, sino también generar beneficios tangibles en términos de eficiencia, resiliencia y calidad de vida.

2.3.2 Viviendas autosostenibles

Las viviendas autosostenibles, también conocidas como viviendas sostenibles o casas autosuficientes, son aquellas que están diseñadas y construidas con el objetivo de minimizar su impacto ambiental, optimizar el uso de recursos naturales y, en muchos casos, generar su propia energía. Estas viviendas van más allá de la construcción sostenible convencional al incorporar tecnologías y prácticas que les permiten funcionar de manera independiente o, al menos, reducir significativamente su dependencia de fuentes externas (Friedman, 2023). Y se caracterizan principalmente por:

Generación de Energía Renovable: Las viviendas autosostenibles a menudo incorporan sistemas de generación de energía renovable, como paneles solares fotovoltaicos, turbinas

eólicas o sistemas de energía hidroeléctrica. Esto permite que la vivienda produzca su propia electricidad y, en algunos casos, incluso genere un excedente que puede ser devuelto a la red.

Eficiencia Energética: Se enfocan en la eficiencia energética mediante la instalación de sistemas de calefacción y refrigeración eficientes, aislamiento térmico, ventanas de alta calidad y electrodomésticos de bajo consumo. La gestión inteligente de la energía también es común, utilizando sistemas automatizados para optimizar el uso de la electricidad.

Captación y Uso del Agua: Las viviendas autosostenibles suelen integrar sistemas de recolección de agua de lluvia, así como tecnologías para el reúso y la conservación del agua. Esto ayuda a reducir la dependencia de fuentes de agua externas.

Gestión de Residuos: Se implementan sistemas de gestión de residuos eficientes, incluyendo el compostaje, la clasificación de residuos para el reciclaje y la reducción de residuos generados en general.

Diseño Bioclimático: La ubicación y orientación de la vivienda se planifican para aprovechar las condiciones climáticas locales. El diseño bioclimático busca maximizar la entrada de luz natural y optimizar la ventilación para reducir la necesidad de iluminación y sistemas de climatización artificiales.

Materiales Sostenibles: La elección de materiales de construcción sostenibles y ecológicos es una característica clave. Esto incluye el uso de materiales reciclados, de origen local, y aquellos con bajos impactos ambientales en su producción.

Autosuficiencia Alimentaria: En algunos casos, las viviendas autosostenibles también incorporan prácticas agrícolas, como la creación de huertos o sistemas de cultivo vertical, para lograr cierto grado de autosuficiencia alimentaria.

Sistemas Inteligentes: La automatización y el uso de sistemas inteligentes para la gestión de la energía, iluminación, seguridad y otros aspectos son comunes en las viviendas autosostenibles.

2.3.3 Sellos de construcción sostenible

En Colombia, así como en muchos otros países, existen diversas certificaciones ambientales y sellos de construcción sostenible que buscan reconocer y promover edificaciones que cumplan con estándares ambientales y de eficiencia, como (Carmona et al., 2023; Cascone et al., 2021b):

LEED (Leadership in Energy and Environmental Design): Aunque es una certificación internacional, el sistema LEED es ampliamente utilizado en Colombia. Se centra en

la sostenibilidad de la construcción, evaluando aspectos como eficiencia energética, gestión del agua, selección de materiales y calidad ambiental en interiores.

Edge (Excellence in Design for Greater Efficiencies): Desarrollada por el Banco Mundial, Edge es una certificación que se enfoca en la eficiencia de los recursos en la construcción, considerando aspectos como energía, agua, y energía incorporada en los materiales.

Casa Colombia: Esta es una certificación nacional que evalúa la sostenibilidad de viviendas. Se enfoca en criterios como eficiencia energética, uso responsable del suelo, gestión del agua, entre otros.

Sello de Construcción Sostenible ICONTEC: El Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) ofrece un sello de construcción sostenible que evalúa aspectos ambientales, sociales y económicos en proyectos de construcción.

BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method): Aunque es más común en Europa, BREEAM también se utiliza en algunos proyectos en Colombia. Evalúa la sostenibilidad ambiental y social de edificaciones.

Green Globes: Este sistema de evaluación es similar a LEED y se centra en la sostenibilidad de edificaciones. Proporciona retroalimentación continua durante el proceso de diseño y construcción.

Sello Huella de Carbono: Este sello, otorgado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, certifica que una organización o proyecto ha medido y reducido sus emisiones de gases de efecto invernadero.

2.3.4 Tecnologías limpias en la construcción

Las tecnologías limpias en la Construcción para la Sostenibilidad Ambiental se caracterizan por:

Eficiencia Energética: La eficiencia energética en la construcción es esencial para reducir la huella ambiental de los edificios. La implementación de tecnologías como sistemas de iluminación LED, aislamiento térmico avanzado y sistemas de climatización eficientes contribuye a minimizar el consumo de energía. Estas soluciones no solo reducen los costos operativos a lo largo del tiempo, sino que también disminuyen la demanda de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero.

Energías Renovables: La integración de fuentes de energía renovable, como paneles solares y turbinas eólicas, impulsa la transición hacia una construcción más sostenible. Estas

tecnologías permiten generar electricidad de manera limpia y reducir la dependencia de fuentes no renovables, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y fomentando la autosuficiencia energética.

Materiales Sostenibles: El uso de materiales de construcción sostenibles y de bajo impacto ambiental es crucial. Optar por maderas certificadas, hormigón reciclado y productos reciclables no solo conserva los recursos naturales, sino que también reduce la huella de carbono asociada a la construcción. La selección consciente de materiales promueve prácticas más responsables y ecoamigables.

Diseño Bioclimático: El diseño bioclimático se basa en aprovechar las condiciones climáticas locales para optimizar la eficiencia energética. Estrategias como la orientación solar adecuada, la ventilación natural y el uso inteligente del paisaje para proporcionar sombra contribuyen a la eficiencia del edificio y a la comodidad de los ocupantes, sin comprometer la sostenibilidad.

Captura y Reutilización de Agua: La gestión del agua es esencial en la construcción sostenible. Sistemas de recolección de agua de lluvia, tecnologías de purificación y sistemas de riego eficientes ayudan a reducir la demanda de agua potable y a minimizar el impacto en los recursos hídricos locales. Estas prácticas fomentan el uso responsable del agua en los proyectos de construcción.

Tecnologías BIM (Building Information Modeling): La implementación de tecnologías BIM revoluciona la planificación y gestión de proyectos. Estos modelos digitales tridimensionales facilitan la coordinación entre equipos, optimizan la eficiencia en el uso de recursos y reducen los errores durante la construcción. La visualización precisa y la colaboración mejorada conducen a proyectos más eficientes y sostenibles.

Sistemas de Gestión de Residuos: La generación de residuos es un desafío en la construcción, y los sistemas de gestión adecuados son fundamentales. Prácticas que reducen, reciclan y gestionan de manera eficiente los residuos de construcción minimizan el impacto ambiental. La adopción de tecnologías y procesos que fomentan la economía circular contribuye a la sostenibilidad del ciclo de vida de los materiales.

Prefabricación: La prefabricación se destaca como una tecnología que permite una construcción más eficiente. La fabricación de componentes en entornos controlados reduce el desperdicio y mejora la calidad de los materiales. Esta técnica no solo acelera los plazos de construcción, sino que también disminuye la huella ambiental al reducir la necesidad de transporte y minimizar la actividad en el sitio.

Sensores y Tecnologías Inteligentes: La integración de sensores y sistemas inteligentes permite el monitoreo en tiempo real y la optimización del rendimiento de edificios. Ajustar automáticamente la iluminación, la climatización y otros sistemas mejora la eficiencia operativa.

Estas tecnologías aseguran que los edificios operen de manera eficiente y sostenible, respondiendo dinámicamente a las condiciones y necesidades cambiantes.

Innovaciones en la Construcción 3D: Las tecnologías de impresión 3D están revolucionando la construcción al ofrecer métodos eficientes y sostenibles. La construcción 3D reduce el uso de materiales, acelera la ejecución del proyecto y ofrece diseños arquitectónicos innovadores. Esta tecnología promete transformar la industria hacia prácticas más sostenibles y personalizadas.

2.4 Marco Teórico

La construcción sostenible se ha convertido en una prioridad global ante los desafíos ambientales y la necesidad de promover un desarrollo urbano responsable (Miller & Buys, 2013). La implementación de nuevas tecnologías y buenas prácticas ambientales es fundamental para reducir el impacto negativo de la construcción sobre el medio ambiente y mejorar la calidad de vida en las ciudades. Este marco teórico explora los conceptos fundamentales y las tecnologías aplicables para la construcción de viviendas autosostenibles, enfocándose en el contexto de Colombia (Lima et al., 2021).

La construcción sostenible se refiere a la creación de edificios que son ambientalmente responsables y eficientes en el uso de recursos a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la planificación y diseño, pasando por la construcción y operación, hasta la demolición y reciclaje.

Este enfoque busca minimizar el impacto ambiental mediante la reducción del consumo de recursos naturales, la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero y la mejora de la eficiencia energética y del agua (Lima et al., 2021).

El uso de materiales sostenibles es crucial para reducir la huella de carbono de la construcción. Materiales locales y reciclados, como el bambú, la guadua, y el cemento con pozzolana, no solo disminuyen las emisiones de CO2 sino que también promueven la economía local y la conservación de recursos. El bambú y la guadua, por ejemplo, son abundantes en Colombia y tienen propiedades excepcionales de resistencia y flexibilidad, mientras que el cemento con pozzolana reduce la necesidad de cemento Portland, conocido por su alto impacto ambiental (Hamada et al., 2023).

Las energías renovables juegan un papel vital en la construcción sostenible. La instalación de paneles solares fotovoltaicos y colectores solares térmicos permite a las viviendas generar su propia electricidad y calor, reduciendo la dependencia de fuentes de energía fósil y las emisiones de gases de efecto invernadero. En un país con una alta radiación solar como Colombia, estas tecnologías son particularmente efectivas y rentables (Iulo & Lowe, 2023).

La eficiencia energética es otro pilar de la construcción sostenible. La iluminación LED y los electrodomésticos de bajo consumo reducen significativamente el uso de energía en el hogar. Además, el diseño bioclimático, que considera la orientación y ventilación natural, puede

disminuir la necesidad de climatización artificial, aprovechando al máximo los recursos naturales disponibles (Lorek & Spangenberg, 2019).

La gestión del agua es esencial para reducir el consumo y promover su reutilización. Los sistemas de captación de agua de lluvia y tratamiento de aguas grises permiten aprovechar fuentes alternativas de agua para usos no potables, mientras que los dispositivos de ahorro de agua, como grifos y duchas de bajo flujo, ayudan a disminuir el consumo diario (Roufechaei et al., 2014).

La construcción prefabricada es una estrategia eficaz para mejorar la eficiencia y sostenibilidad en la construcción. Los módulos estructurales prefabricados y los paneles aislantes prefabricados no solo aceleran el proceso constructivo, sino que también minimizan el desperdicio de materiales y mejoran la eficiencia energética de las edificaciones (Nagarjuna et al., 2022).

Las tecnologías digitales, como el Modelado de Información de Construcción (BIM) y los sistemas domóticos, facilitan una planificación y gestión más precisa y eficiente de los recursos. Estas herramientas permiten optimizar el diseño y la operación de los edificios, garantizando que se cumplan los objetivos de sostenibilidad y eficiencia a lo largo del ciclo de vida del proyecto (Kim, 2019).

La construcción sostenible en Colombia requiere una integración coherente de materiales, tecnologías y prácticas que promuevan un uso eficiente de los recursos y reduzcan el impacto ambiental. Este marco teórico proporciona una base para entender y aplicar estos conceptos en el contexto de la construcción de viviendas autosostenibles, ofreciendo una guía práctica para el desarrollo urbano sostenible y resiliente en el país. Al adoptar estas innovaciones, es posible avanzar hacia un futuro donde las ciudades sean más amigables con el entorno ambiental y social, mejorando la calidad de vida de sus habitantes.

2.4.1 Tecnologías sostenibles

La construcción verde representa un cambio significativo en la forma en que concebimos, diseñamos, construimos y operamos edificios e infraestructuras. Su enfoque holístico considera no solo el consumo de energía, agua y materiales durante la vida útil de un edificio, sino también su impacto en el entorno circundante y la salud de quienes lo ocupan. Esta práctica busca reducir tanto el impacto ambiental como los costos asociados con la construcción y el mantenimiento de edificaciones, al tiempo que proporciona un entorno más saludable y productivo para sus usuarios (Iddio et al., 2020).

La investigación en el campo de la construcción sostenible está arrojando luz sobre nuevas metodologías y tecnologías que pueden transformar la industria. Por ejemplo, el estudio de (Chau et al., 2017) sobre la instalación alternativa de cruces de agua en tuberías muestra cómo pequeños cambios en los procesos de construcción pueden tener un impacto significativo en la

reducción de emisiones de CO_2. Del mismo modo, el trabajo de (Tumminia et al., 2018) sobre las torres de concreto prefabricado hexagonales demuestra cómo el diseño innovador puede abrir nuevas oportunidades para la generación de energía eólica.

Además, la gestión eficiente de los residuos de construcción y la aplicación de modelos GIS 4D están emergiendo como herramientas importantes para reducir el impacto ambiental de la construcción urbana (Deng et al., 2019; Luhar et al., 2021). El estudio de Lam et al. sobre la estimación de residuos de construcción resalta la importancia de cuantificar y gestionar adecuadamente estos desechos para minimizar su impacto en el medio ambiente. Asimismo, el trabajo de Wang et al. sobre el metabolismo urbano de edificios destaca el potencial de los modelos espaciales-temporales para informar decisiones de diseño y planificación urbana más sostenibles.

El uso de tecnologías como el Modelado de Información de Construcción (BIM) también está revolucionando la forma en que se diseñan y gestionan los edificios. La revisión de (Gu, 2021) sobre la interoperabilidad en el ciclo de vida del BIM muestra cómo esta herramienta puede facilitar una gestión más efectiva y sostenible de los proyectos de construcción.

En última instancia, la construcción verde no solo es una cuestión de tecnología y diseño, sino también de cambio cultural y comercial. A medida que la conciencia sobre los problemas ambientales continúa creciendo y la demanda de edificaciones sostenibles aumenta, existe una creciente presión para adoptar prácticas más responsables desde el punto de vista ambiental. Sin

embargo, para que esta transición sea exitosa, es necesario que exista un sólido caso comercial para los edificios verdes, lo que requiere una comprensión clara de los beneficios económicos, sociales y ambientales asociados con la construcción sostenible (Affolderbach et al., 2018).

2.4.2 Construcciones de bajo carbono

El sector de la construcción, por su alta intensidad energética y su significativo impacto ambiental, ha emergido como un campo crucial en la lucha contra el cambio climático y la descarbonización. A medida que el mundo avanza hacia una economía más sostenible, se ha vuelto imperativo abordar los desafíos ambientales asociados con la construcción y operación de edificaciones. En este contexto, la investigación ha puesto énfasis en comprender el estado actual de la industria de la construcción, explorar las fronteras tecnológicas disponibles y futuras, y analizar las tendencias de desarrollo desde una perspectiva de bajo carbono (D'Alessandro et al., 2017).

El estudio de aspectos como el consumo energético y las emisiones de carbono en la construcción actual y futura ha arrojado luz sobre áreas críticas donde se pueden implementar mejoras significativas. Además, la evaluación de estándares de rendimiento energético y la medición de mejoras en la construcción baja en carbono han permitido identificar oportunidades para optimizar la eficiencia y reducir la huella ambiental de los proyectos de construcción (D'Alessandro et al., 2017).

Una parte fundamental de esta investigación ha sido comprender los comportamientos de consumo bajo en carbono y cómo estos pueden influir en el diseño, construcción y operación de edificaciones (Average, 2019). Se ha observado que la adopción de prácticas más sostenibles por parte de los ocupantes de los edificios puede tener un impacto significativo en la reducción de emisiones a lo largo del ciclo de vida de una construcción (Lee et al., 2013).

Además de explorar las prácticas actuales y futuras en la construcción sostenible, los estudios también han examinado el papel del gobierno en la formulación de políticas para promover el desarrollo de ciudades bajas en carbono. Se ha demostrado que las políticas gubernamentales desempeñan un papel crucial en la adopción de tecnologías y prácticas más sostenibles en el sector de la construcción, así como en la creación de un entorno propicio para la innovación y la inversión en soluciones de bajo carbono (Tuohy & Murphy, 2015).

En términos de metodologías de evaluación, los investigadores han desarrollado enfoques innovadores para medir la eficiencia y el impacto ambiental de la industria de la construcción. Por ejemplo, el uso de análisis envolvente de datos combinado con el principio de balance de materiales ha permitido evaluar de manera integral la eficiencia de costos, técnicos y ambientales del sector de la construcción en países como China (Shi & Zhou, 2012).

Además, se han explorado estrategias específicas para reducir el carbono incorporado en la construcción, como la promoción de la construcción prefabricada y la gestión eficiente de los desechos de construcción. Estas estrategias no solo tienen el potencial de reducir las emisiones

de carbono asociadas con la construcción, sino que también pueden mejorar la eficiencia y la rentabilidad de los proyectos de construcción.

La investigación en el campo de la construcción baja en carbono ha proporcionado una visión integral de los desafíos y oportunidades asociados con la transición hacia un sector de la construcción más sostenible. Desde la formulación de políticas hasta la implementación de tecnologías innovadoras, se ha demostrado que una combinación de enfoques es necesaria para abordar eficazmente el cambio climático y promover la construcción sostenible a nivel mundial.

2.5 Marco Legal

2.5.1 Contexto internacional

El ámbito legal internacional ha sido fundamental en la promoción del desarrollo sostenible y la garantía del derecho a un ambiente saludable. Diversas normas, acuerdos y eventos han marcado hitos importantes en esta trayectoria, contribuyendo a la conciencia global sobre la necesidad de proteger nuestro entorno. A continuación, se detallan algunos de los puntos clave en este marco legal:

Declaración de Estocolmo (1972): La Conferencia de las Naciones Unidas emitió la Declaración de Estocolmo, un documento pionero que, en 1972, planteó por primera vez la cuestión del medio ambiente. Contiene 106 Recomendaciones y 24 Principios, destacando el

derecho al desarrollo sostenible y la importancia de la protección del medio ambiente para el bienestar humano y de otras formas de vida.

Comisión Brundtland: Nuestro Futuro Común (1987): Presentado por la Comisión Mundial Para el Medio Ambiente y el Desarrollo de la ONU, este informe, encabezado por la doctora noruega Gro Harlem Brundtland, alertó sobre el devastador impacto ambiental del camino tomado por la sociedad a nivel global. Introdujo el concepto de desarrollo sostenible, abogando por la protección del medio ambiente como una responsabilidad global, integrándose posteriormente en programas de la ONU y sirviendo como base para la Cumbre de la Tierra de 1992 (Kono, N., 2023).

Convenio de Viena (1987): Este convenio, vigente desde septiembre de 1988 y ratificado por 33 países de América Latina y el Caribe, tiene como objetivo respaldar investigaciones sobre el impacto humano en la capa de ozono. Permite la adopción de medidas legislativas contra actividades perjudiciales para la capa de ozono.

Protocolo de Montreal (1989): Un acuerdo ambiental internacional que logró aprobación universal para preservar la capa de ozono, eliminando el uso de sustancias agotadoras de esta capa. Su impacto positivo se refleja en la reducción de emisiones acumuladas de CO2 en 135.000 millones de toneladas durante el período 1989-2013 (Sabogal, N., 1998).

Declaración de Río de Janeiro (1992): Conocida como la Cumbre de la Tierra, esta conferencia fortaleció el concepto de desarrollo sostenible. La firma de la Agenda 21, un plan de acción mundial para el desarrollo sostenible, y la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, definiendo derechos y obligaciones de los países en relación con el medio ambiente, fueron hitos significativos. También se estableció la Declaración de Principios Forestales, el primer acuerdo para preservar los bosques.

Protocolo de Kyoto (1997): Este protocolo se compromete a estabilizar las emisiones de gases de efecto invernadero, implementando políticas a nivel internacional para reducir las emisiones de seis gases causantes del efecto invernadero. Estos incluyen el Dióxido de carbono (CO2), Metano (CH4), Óxido Nitroso (N2O), Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC) y Hexafluoruro de Azufre (SF6).

Estas iniciativas reflejan la evolución y consolidación del marco legal internacional en la protección del medio ambiente y la promoción del desarrollo sostenible, estableciendo fundamentos sólidos para abordar los desafíos ambientales actuales y futuros a nivel global.

2.5.2 Contexto nacional

Colombia, en su compromiso por dar cumplimiento a los acuerdos internacionales orientados al desarrollo sostenible, ha establecido un marco legal robusto que regula diversas

facetas del tema ambiental. A continuación, se detallan las principales normativas nacionales que han sido promulgadas con este propósito:

Ley 23 (1973): En 1973, se concedieron facultades extraordinarias al presidente para expedir el Código de Recursos Naturales y Protección al Medio Ambiente. Esta ley busca prevenir y controlar la contaminación, así como mejorar, conservar y restaurar los recursos naturales renovables en defensa de la salud y el bienestar de los habitantes del territorio nacional.

Decreto 2811 (1974): En 1974, se dictó el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, estableciendo normativas para la gestión y conservación de los recursos naturales.

Ley 9 (1979): En 1979, se decretaron medidas sanitarias para la protección del medio ambiente, abordando agentes biológicos, físicos o químicos que pudieran alterar el entorno y representar riesgos para la salud humana.

Resolución 8321 (1983): En 1983, se emitieron normas sobre la protección y conservación de la audición, reconociendo la importancia de salvaguardar la salud relacionada con la exposición al ruido.

Ley 99 (1993): En 1993, se estableció la Ley General Ambiental de Colombia, creando el Ministerio del Medio Ambiente, reorganizando el Sector Público relacionado con la gestión ambiental, y dando forma al Sistema Nacional Ambiental (SINA). Esta ley establece el procedimiento para otorgar licencias ambientales, así como estudios de impacto ambiental.

Ley 143 (1994): En 1994, se promulgó la Ley 143, regulando la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, estableciendo disposiciones en materia energética.

Resolución 541 (1994): En 1994, se implementaron normativas mediante la Resolución 541 para regular el cargue, descargue, transporte, almacenamiento y disposición final de escombros y materiales de construcción.

Decreto 948 (1995): En 1995, se reglamentaron disposiciones relacionadas con la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire, abordando también el manejo de residuos sólidos de construcción.

Ley 373 (1997): En 1997, se estableció el programa para el uso eficiente y ahorro del agua, buscando gestionar responsablemente este recurso vital.

Ley 388 (1997): En 1997, se aprobó la Ley de Desarrollo Territorial, que insta a los municipios a formular Planes de Ordenamiento Territorial, buscando el desarrollo en armonía con el medio ambiente y las tradiciones culturales.

Decreto 3102 (1997): En 1997, se reglamentó la instalación de equipos, sistemas e implementos de bajo consumo de agua, promoviendo prácticas sostenibles en el uso del agua.

Decreto 1052 (1998): En 1998, se reglamentaron disposiciones referentes a licencias de construcción y urbanismo, así como sanciones urbanísticas.

Ley 697 (2001): En 2001, se aprobó la Ley 697, fomentando el uso racional y eficiente de la energía, y promoviendo el uso de energías alternativas.

Decreto 1713 (2002): En 2002, se reglamentaron disposiciones relacionadas con la prestación del servicio público de aseo y la gestión integral de residuos sólidos.

Decreto 838 (2005): En 2005, se reglamentaron disposiciones sobre la disposición final de residuos sólidos, estableciendo consideraciones ambientales y técnicas para la planificación, construcción y operación de rellenos sanitarios.

Conpes 3343 (2005): En 2005, se aprobó el documento Conpes 3343, estableciendo lineamientos y estrategias para el desarrollo sostenible en los sectores de agua, ambiente y desarrollo territorial.

Decreto 2501 (2007): En 2007, se dictaron disposiciones para promover prácticas de uso racional y eficiente de la energía eléctrica.

Ley 1259 (2008): En 2008, se instauró la aplicación del comparendo ambiental a los infractores de las normas de aseo, limpieza y recolección de escombros.

Política de Gestión Ambiental Urbana (2008): En 2008, se adoptó la Política de Gestión Ambiental Urbana, estableciendo pautas para el manejo sostenible de las áreas urbanas con miras a construir ciudades sostenibles.

Decreto 3695 (2009): En 2009, se reglamentó la Ley 1259 de 2008, estableciendo lineamientos para la imposición de comparendos ambientales.

Decreto 1469 (2010): En 2010, se reglamentaron disposiciones relativas a las licencias urbanísticas, el reconocimiento de edificaciones, y la función pública de los curadores urbanos.

Agenda 21 (2012): En 2012, se aprobó la Agenda 21, orientada a incorporar parámetros de sostenibilidad ambiental en el desarrollo de las ciudades, abarcando aspectos como la gestión de residuos y la construcción de edificaciones.

Criterios Ambientales para el Diseño y Construcción de Vivienda Urbana (2012): En 2012, se establecieron criterios ambientales para el diseño y construcción de vivienda urbana, promoviendo la sostenibilidad a través de la gestión adecuada de recursos naturales y la minimización del impacto ambiental.

Código de Construcción Sostenible (2013): En 2013, se implementó el Código de Construcción Sostenible en Colombia, desarrollado para mitigar el impacto ambiental del sector de la construcción.

Documento Conpes 3819 (2014): En 2014, se aprobó el Documento Conpes 3819, que establece la política nacional para consolidar el sistema de ciudades en Colombia, buscando construir "Ciudades Sostenibles y Competitivas".

Decreto 1285 (2015): En 2015, se modificó el Decreto 1077 de 2015, en lo relacionado con los lineamientos de construcción sostenible para edificaciones.

Resolución 0549 (2015): En 2015, se reglamentó el capítulo 1 del título 7 de la parte 2, del libro 2 del Decreto 1077 de 2015, en cuanto a los parámetros y lineamientos de construcción sostenible y se adoptó la Guía para el ahorro de agua y energía en edificaciones.

Resolución 472 (2017): En 2017, se reglamentó la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición, estableciendo pautas para su adecuado manejo y disposición.

Capítulo 3. Diseño Metodológico

3.1 Tipo de investigación

Esta investigación adopta un enfoque documental, centrado en la recopilación, análisis y síntesis de información proveniente de fuentes documentales. En este contexto, el estudio se basará en la exploración y revisión exhaustiva de documentos, artículos científicos, informes técnicos y otras fuentes relevantes que aborden los criterios para la construcción de viviendas autosostenibles. La metodología documental permite un análisis detallado de la evolución de los enfoques sostenibles en la construcción, identificando tendencias, avances y desafíos a lo largo del tiempo.

Además, la investigación incorporará herramientas bibliométricas para complementar el análisis documental. Estas herramientas bibliométricas permitirán cuantificar y evaluar la relevancia, impacto y la interconexión de las fuentes documentales utilizadas en el estudio. Se emplearán indicadores bibliométricos para analizar la producción científica en el campo de la construcción sostenible, identificar autores clave, revistas prominentes y áreas temáticas preponderantes. Este enfoque bibliométrico no solo fortalecerá la fundamentación teórica de la investigación, sino que también proporcionará una visión panorámica de la estructura y dinámica del conocimiento en el ámbito de la construcción sostenible, contribuyendo así a una comprensión más completa y actualizada de la materia.

3.2 Seguimiento metodológico del proyecto

La investigación tiene como objetivo principal analizar la literatura científica y técnica sobre los criterios y principios clave para la construcción de viviendas autosostenibles, centrándose en tecnologías innovadoras y buenas prácticas ambientales. Para alcanzar este objetivo, se han diseñado una serie de actividades específicas. En primer lugar, se llevará a cabo una exhaustiva revisión y selección de artículos científicos, informes técnicos y documentos relevantes, con el objetivo de obtener una amplia base de información. Posteriormente, se realizará un análisis detallado de las tendencias y avances identificados en la literatura científica, con el fin de sintetizar la información obtenida e identificar los aspectos más relevantes. Además, se buscará identificar las tecnologías y materiales más pertinentes para la construcción sostenible, evaluando su aplicabilidad en el contexto colombiano, tomando en consideración el contexto de países en desarrollo.

Finalmente, se evaluará el impacto potencial de la implementación de estos criterios de construcción sostenible en términos de reducción de consumo de recursos naturales, emisiones de CO2 y consumo energético en el ciclo de vida de las viviendas construidas bajo estos estándares, específicamente en Colombia. Como resultado final, se elaborará una guía con recomendaciones específicas y aplicables para la construcción de viviendas autosostenibles en Colombia, integrando nuevas tecnologías y buenas prácticas ambientales, con el objetivo de promover un desarrollo urbano amigable con el entorno ambiental y social. En la tabla 1 se indica el conjunto de indicadores y actividades por objetivos que permiten realizar un seguimiento metodológico al proyecto. Asi mismo, en la figura 1 se indica la estructura metodológica del proyecto.

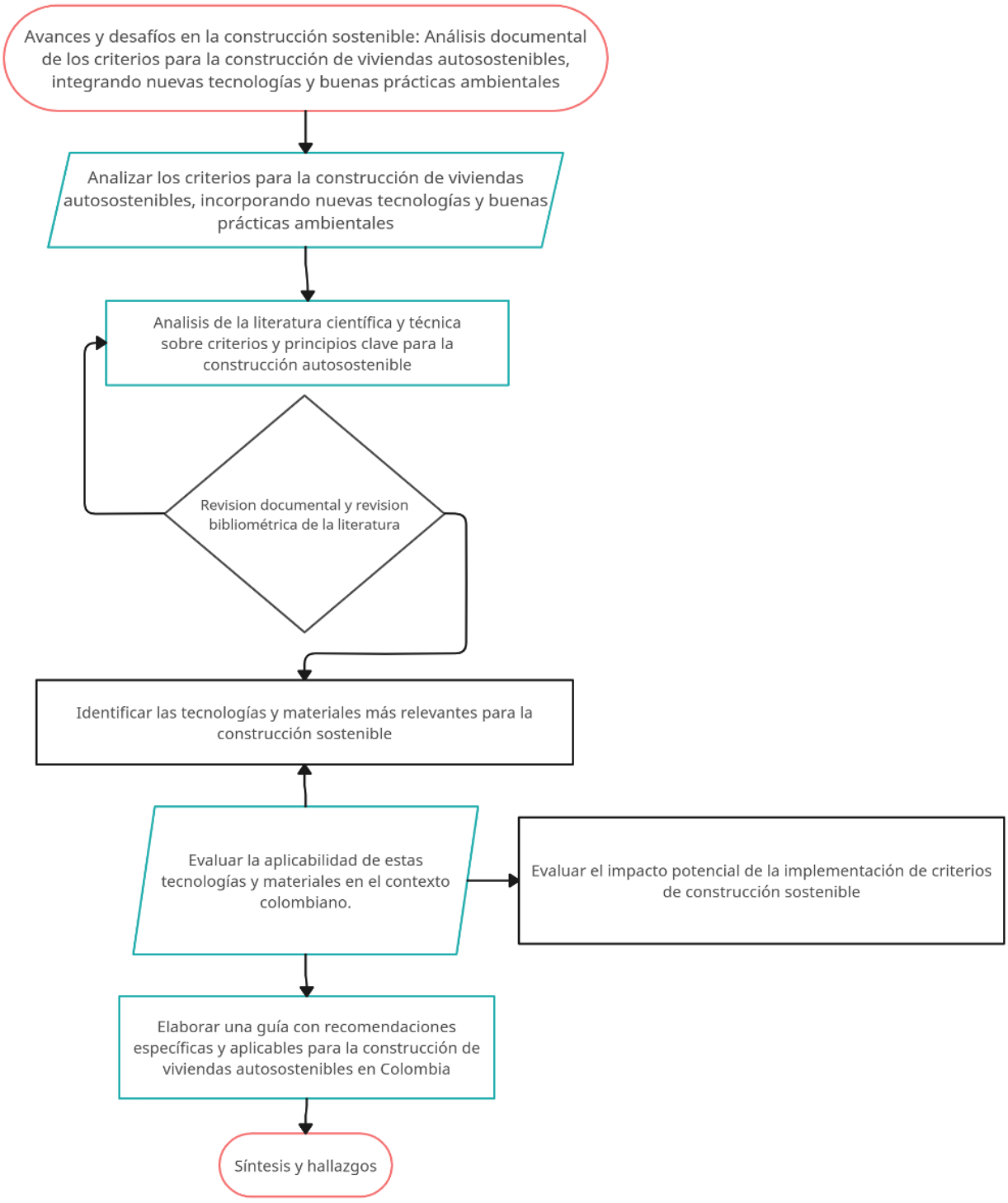
Tabla 1 *Modelo Metodológico*

Objetivos De La Investigación	Actividades Por Objetivo	Indicador Por Actividad
Obj 1. Analizar la literatura científica y técnica sobre criterios y principios clave para la construcción de viviendas autosostenibles, enfocándose en tecnologías innovadoras y buenas prácticas ambientales.	Act 1. Revisar y seleccionar artículos científicos, informes técnicos y documentos relevantes.	Ind 1. Número de fuentes documentales revisadas y seleccionadas.
	Act 2. Realizar un análisis detallado de las tendencias y avances en la literatura científica.	Ind 2. Síntesis de tendencias y avances identificados.
Obj 2. Identificar las tecnologías y materiales más relevantes para la construcción sostenible y determinar su aplicabilidad en el contexto de países en desarrollo, utilizando Colombia como estudio de caso.	Act 3. Identificar tecnologías y materiales clave mediante revisión documental y análisis de casos similares.	Ind 3. Lista de tecnologías y materiales identificados.
	Act 4. Evaluar la aplicabilidad de estas tecnologías y materiales en el contexto colombiano.	Ind 4. Informe de evaluación de aplicabilidad en el contexto colombiano.
Obj 3. Evaluar el impacto potencial de la implementación de criterios de construcción sostenible en términos de reducción de consumo de recursos naturales, emisiones de CO2 y consumo energético en el ciclo de vida de las viviendas construidas bajo estos estándares en países en desarrollo, específicamente en Colombia.	Act 5. Recopilar datos sobre consumo de recursos, emisiones y consumo energético en la construcción sostenible.	Ind 5. Conjunto de datos recopilados y documentados.
	Act 6. Analizar y comparar los datos recopilados con estándares y normativas internacionales.	Ind 6. Informe de análisis y comparación de datos.
Obj 3. Elaborar una guía con recomendaciones específicas y aplicables para la construcción de viviendas autosostenibles en Colombia, integrando nuevas tecnologías y buenas prácticas ambientales.	Act 7. Sintetizar hallazgos clave en una guía práctica.	Ind 6. Guía elaborada con recomendaciones específicas.

3.3 Población

La población objetivo de esta investigación se centra en actores clave involucrados en la construcción, abarcando diversos sectores que influyen en el diseño, construcción y gestión de viviendas en países en desarrollo, con énfasis en el contexto colombiano

Figura 1 *Estructura metodológica del proyecto*



3.4 Muestra

La muestra de esta investigación se seleccionará estratégicamente para representar de manera significativa la diversidad de actores clave en el ámbito de la construcción sostenible, específicamente enfocándose en la edificación de viviendas autosostenibles en el contexto colombiano.

3.5 Técnicas de recolección y análisis de la información

Para llevar a cabo la revisión sistemática de la literatura, se adoptó una metodología cuantitativa estructurada en cuatro pasos: recolección de datos, análisis descriptivo, selección de categorías y evaluación del material (Akadiri et al., 2013). Esta metodología permite una replicación precisa del proceso para identificar, seleccionar y evaluar documentos en la literatura sobre el tema de investigación.

Para la recolección de estudios primarios, se utilizó la base de datos Scopus, que es reconocida por su amplia cobertura de literatura científica. Se diseñó una estrategia de búsqueda exhaustiva utilizando tres conjuntos de palabras clave (Principales, Secundarios y Relacionados). La lógica booleana "y/o" se empleó para combinar estos términos y asegurar una búsqueda amplia que abarcase todas las áreas relevantes. La búsqueda se centró en artículos publicados entre enero de 2013 y diciembre de 2023, lo que permitió cubrir una ventana de observación de 10 años. Esta delimitación temporal se justificó con el objetivo de captar las tendencias y desarrollos más recientes en el campo de las viviendas sostenibles, asegurando la relevancia y actualidad de los datos recopilados.

La búsqueda inicial arrojó un total de 1028 artículos. Para asegurar la pertinencia de los estudios, se aplicaron criterios de exclusión específicos, los cuales filtraron los resultados a 531 artículos. Los criterios de exclusión incluyeron la eliminación de artículos no escritos en inglés, aquellos que solo tenían disponibles sus resúmenes y los que no se relacionaban directamente con la sostenibilidad en la industria de la construcción.

Una vez filtrados los artículos, se procedió a su lectura y selección, categorizando los documentos según su relevancia y contribución al tema. Se generaron diferentes categorías temáticas que permitieron una organización sistemática de la información, facilitando el análisis posterior.

Para la evaluación detallada del material seleccionado, se utilizó la herramienta de software VOSviewer. Esta herramienta es especialmente útil para el análisis bibliométrico y la visualización de redes. Con VOSviewer, se creó un metaanálisis que incluyó información de las revistas que publicaron artículos relacionados, así como datos de los autores, títulos y palabras clave de los 531 documentos. Los mapas generados reflejaron las conexiones y relaciones entre los términos, representados mediante círculos cuyo tamaño estaba determinado por el peso del ítem, y líneas que representaban los vínculos entre los términos.

3.5.1 Criterios para la evaluación de la implementación de criterios de construcción sostenible

Para llevar a cabo una evaluación rigurosa de la implementación de criterios de construcción sostenible en el contexto de países en desarrollo, específicamente en Colombia, se utilizaron matrices de evaluación. Estas matrices fueron diseñadas para analizar y calificar diversas tecnologías y materiales relevantes, considerando múltiples aspectos esenciales para determinar su viabilidad e impacto en términos de sostenibilidad y eficiencia. La metodología se inspiró en estudios previos y enfoques utilizados en evaluaciones similares, adoptando un marco integral que abarca una variedad de factores críticos (Anbari Moghadam et al., 2024; Mavi et al., 2021).

Las matrices de evaluación proporcionan un método estructurado y sistemático para comparar diferentes tecnologías y materiales en función de una serie de criterios específicos. Las matrices de evaluación se centraron en los siguientes aspectos (Akadiri et al., 2013; Rostamnezhad & Thaheem, 2022):

- Disponibilidad y Acceso: Facilidad de obtención e implementación en el mercado colombiano.
- Costos Iniciales: Inversión inicial requerida para la adopción de las tecnologías.
- Reducción de Consumo de Recursos: Capacidad para disminuir el uso de recursos naturales.
- Emisiones de CO_2 a lo largo del Ciclo de Vida: Impacto en la huella de carbono.

- Consumo Energético a lo largo del Ciclo de Vida: Eficiencia energética durante el uso y disposición.
- Integración en Proyectos de Construcción: Facilidad de implementación en proyectos nuevos y existentes.
- Eficiencia en el Uso de Materiales: Optimización del uso y reducción de desperdicios.
- Mantenimiento y Operatividad: Requisitos de mantenimiento y durabilidad a lo largo del tiempo.
- Impacto en la Velocidad de Construcción: Efecto sobre los tiempos de construcción y la eficiencia del proyecto.
- Política y Regulaciones: Apoyo gubernamental y marco regulatorio.
- Impacto Socioeconómico: Contribución al desarrollo económico y creación de empleo.
- Adaptabilidad a Diferentes Contextos: Capacidad de adaptación a diversas condiciones regionales y climáticas.

Para cada aspecto, se asignaron puntuaciones en una escala del 1 al 5, donde:

1: Evaluación muy baja o desfavorable.
2: Evaluación baja.
3: Evaluación media.
4: Evaluación alta.
5: Evaluación muy alta o favorable.

Las puntuaciones se asignaron basándose en la revisión de la literatura existente, estudios de caso específicos, y la evaluación del contexto colombiano en términos de recursos, infraestructura y regulaciones. Esta metodología permitió una comparación integral y estructurada de las diferentes tecnologías y su potencial impacto en la construcción sostenible.

Capítulo 4. Resultados

4.1 Analizar la literatura científica y técnica disponible sobre los criterios y principios claves para la construcción de viviendas autosostenibles, enfocándose en la integración de tecnologías innovadoras y buenas prácticas ambientales.

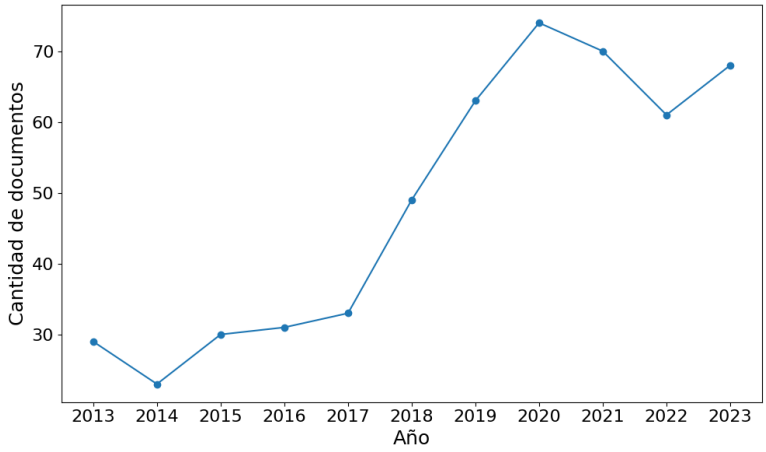
De la revisión sistemática de la literatura, se realizaron algunos análisis sobre los 531 artículos seleccionados. Estos artículos fueron analizados en cuanto a sus características generales y para extraer datos sobre sostenibilidad en la construcción de viviendas con mayor detalle.

4.1.1 Frecuencia del número de artículos publicados por año

Teniendo en cuenta todos los criterios utilizados para realizar la revisión de literatura, se pudo identificar la evolución de los estudios publicados en el área en el período cubierto por este estudio (2013-2023). También se encontró que el número de artículos publicados aumentó con el tiempo. Hubo aumentos especialmente marcados entre 2018 y 2020, como se muestra en la Figura 2.

Figura 2

Numero de Publicaciones entre 2013 y 2023.



La cantidad de publicaciones por año en un campo de investigación proporciona una visión general del nivel de actividad y el interés en ese tema a lo largo del tiempo. Al analizar los datos disponibles sobre la cantidad de publicaciones por año en un área específica, como la construcción sostenible, podemos observar tendencias y patrones significativos. En primer lugar, al examinar los datos desde 2013 hasta 2023, se nota un patrón general de crecimiento en la cantidad de publicaciones año tras año. Este crecimiento progresivo sugiere un aumento en el interés y la actividad en el campo de la construcción sostenible a lo largo del tiempo. Sin embargo, esta tendencia no es completamente lineal, ya que hay fluctuaciones en el número de publicaciones en ciertos años.

Los años más destacados en términos de cantidad de publicaciones son 2020 y 2021, con 74 y 70 publicaciones respectivamente. Estos años podrían haber sido períodos de particular actividad o interés en el campo, posiblemente impulsados por factores como avances tecnológicos, cambios en políticas gubernamentales o la urgencia de abordar problemas

ambientales globales El aumento en el número de artículos puede justificarse por el creciente interés en las estrategias de mejora del sector de la construcción. Por ejemplo, muchos artículos destacaron el uso de productos reciclados, gestión de residuos y selección de materiales para la gestión de la sostenibilidad (Ceja Soto et al., 2020; Gangolells et al., 2009; Oyinlola & Whitehead, 2020), ya que la industria de la construcción se considera uno de los sectores que contribuyen negativamente a aspectos relacionados con el medio ambiente, consumiendo recursos renovables y no renovables y siendo uno de los mayores productores de residuos (Liu et al., 2024). Por lo tanto, se sabe que estos problemas tienen un alto potencial para el calentamiento global y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), desde el diseño, construcción y operación hasta la eliminación de residuos después de la finalización de las obras en el lugar de construcción (Lima et al., 2021).

Por otro lado, hay años con una menor cantidad de publicaciones, como 2014 y 2016, que muestran un descenso en comparación con los años circundantes. Estas caídas podrían atribuirse a diversas razones, como cambios en las prioridades de investigación, fluctuaciones en la financiación disponible o eventos externos que pueden haber desviado la atención de los investigadores. Las fluctuaciones anuales en el número de publicaciones pueden ser indicativas de cambios en la dinámica del campo de investigación. Por ejemplo, un aumento repentino en el número de publicaciones podría estar relacionado con la introducción de nuevas políticas o tecnologías que estimulan la investigación en ese campo específico. Sin embargo, Existen pruebas contundentes que explican el crecimiento en el número de artículos a partir de 2014. La primera es que antes de entonces, para llevar a cabo trabajos en un sitio, las estrategias de construcción no consideraban ni la sostenibilidad ambiental ni la producción más limpia.

A partir de entonces, con el fin de reducir los impactos y aumentar el rendimiento del proceso, se establecieron procedimientos alternativos, que tenían como objetivo la eficiencia general del proceso, garantizando así la sostenibilidad (De Araujo et al., 2023; Grealy et al., 2022; Pagani & Binder, 2019; Xiao et al., 2016). Además, es importante destacar que, en general, la prevalencia de artículos publicados que tratan sobre la sostenibilidad en la industria de la construcción se puede explicar por el hecho de que muchos de estos artículos abordan la construcción en países como Reino Unido, Australia, Estados Unidos y Malasia los cuales se han adherido a la Agenda 21 (Robinson, 1993)como un plan de acción para desarrollar una mayor sostenibilidad. Estos no solo verificaron procesos y estrategias adoptadas para la construcción sostenible a nivel internacional, nacional y regional, sino que también se comprometieron a reducir las emisiones de carbono y los contaminantes (A et al., 2017; Tomovska & Radivojević, 2017), lo anterior se ve reflejado en la Figura 2.

Otro factor importante fue la entrada en vigor de legislaciones específicas para cada mercado (Abuzeinab et al., 2016; Channuntapipat, 2021). Estas nuevas normativas pueden haber influido en el aumento del número de artículos publicados desde 2014, que se dirigen principalmente a los mercados europeo y asiático. La regulación europea n.º 305/2011 (REGULATION (EU) No 305/2011 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, 2011) sobre el mercado de productos de construcción establece declaraciones ambientales de productos como herramientas para evaluar los impactos ambientales y que estas deben incluir todo el ciclo de vida de un producto, creando así nuevos objetivos para reducir las emisiones de CO2 que deben alcanzarse para 2020.

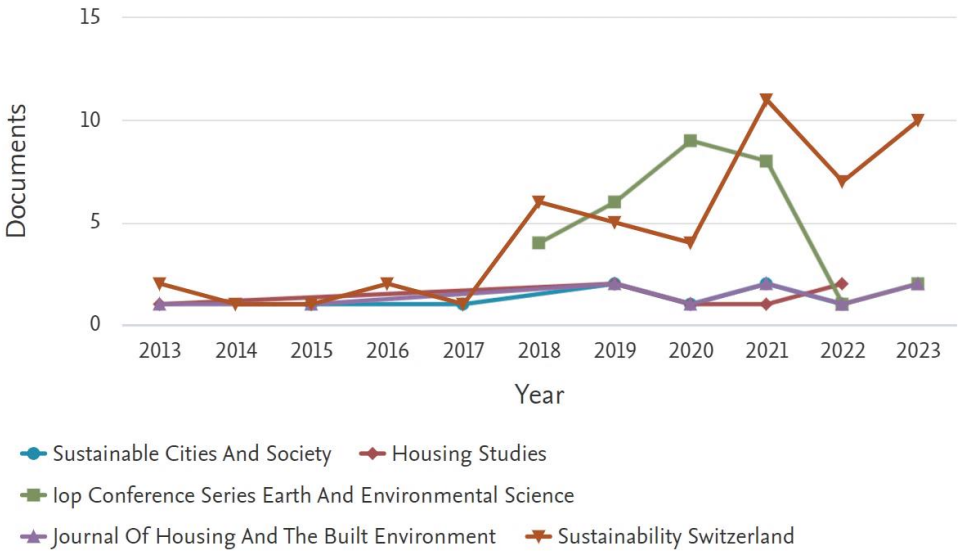
4.1.2 Frecuencia de las principales áreas de las revistas

Los artículos analizados se distribuyen en 126 revistas, 3 de las cuales representan el 17% de los artículos publicados. Realizar esta investigación permitió identificar las principales revistas que abordaban el sector de la ingeniería civil y la sostenibilidad. Estas reflejan directamente la búsqueda de nuevas técnicas de construcción, nuevas tecnologías y materiales para reducir los contaminantes, reducir el uso de energía y agua y gestionar los residuos sólidos generados durante todo el ciclo de vida de las actividades en esta industria.

En la figura 3, se indica el número de citaciones por año para las principales revistas en las cuales se han realizado aportes a la literatura. En primer lugar, es evidente que la sostenibilidad es un tema dominante, con la revista "Sustainability Switzerland" encabezando la lista con 50 publicaciones. Esto sugiere un fuerte enfoque en temas relacionados con la sostenibilidad en la comunidad académica. Además, otras revistas como "Sustainable Cities and Society" y "Journal of Cleaner Production" también reflejan este enfoque en la sostenibilidad, con un número significativo de publicaciones.

Figura 3

Revistas con mayor número de publicaciones sobre el tema de estudio entre 2013 y 2023.



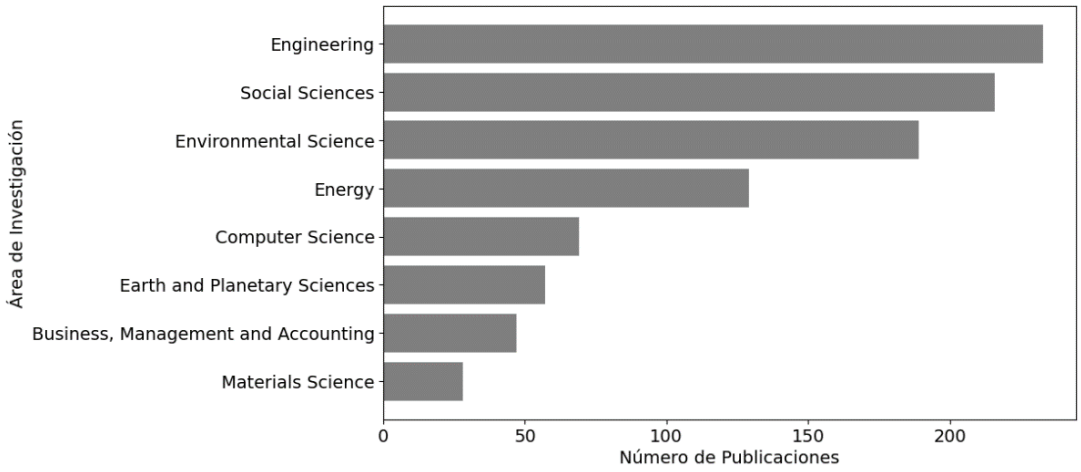
Por otro lado, la ingeniería civil y ambiental parece ser un área de interés destacada, con revistas como "IOP Conference Series Earth and Environmental Science" y "Lecture Notes in Civil Engineering" ocupando posiciones prominentes en la lista. Esto indica un enfoque en temas relacionados con el medio ambiente, la construcción y la planificación urbana.

Además, el sector de la vivienda y el entorno construido también es notable, con revistas como "Journal of Housing and the Built Environment", "Housing Studies" y "Building and Environment" entre las más citadas. Esto sugiere un interés continuo en cuestiones relacionadas con la vivienda, el diseño urbano y la calidad del entorno construido.

Adicionalmente, como se indica en la figura 4, se analizaron las áreas de investigación que enmarcan los artículos analizados, 233 publicaciones corresponden a la ingeniería ocupando el primer lugar, reflejando un enfoque en la aplicación de principios científicos y tecnológicos para desarrollar infraestructuras y edificaciones más respetuosas con el medio ambiente. El contraste entre las áreas de mayor y menor representación resalta la disparidad en la atención dedicada a diferentes aspectos de la sostenibilidad en la construcción. Mientras que la ingeniería lidera el camino, disciplinas como la ciencia de los materiales, con apenas 28 publicaciones, señalan una necesidad de profundizar en el desarrollo de nuevos materiales y técnicas de construcción ecoamigables.

Figura 4

Áreas de investigación.



El análisis también arroja luz sobre la interdisciplinariedad inherente a la construcción sostenible. Áreas como las ciencias sociales y la gestión empresarial, con 216 y 47 publicaciones

respectivamente, evidencian la importancia de considerar factores humanos, económicos y políticos en la implementación de prácticas constructivas sostenibles. La relevancia de estos hallazgos trasciende los confines académicos, impactando directamente en la formulación de políticas públicas y en la toma de decisiones en el sector privado. Las investigaciones en ingeniería, por ejemplo, pueden impulsar el desarrollo de normativas y estándares de construcción más rigurosos, mientras que los estudios en ciencias sociales pueden informar estrategias de participación comunitaria y sensibilización ambiental.

4.1.3 Análisis de palabras clave y análisis de las principales regiones de las instituciones

Como parte de la investigación se emplearon los datos bibliográficos disponibles, como palabras clave y autores, para analizar y comprender la dinámica de un campo científico específico. Para llevar a cabo este análisis, utilizamos VOSviewer, un software de minería de datos de libre acceso, que nos permitió generar mapas bibliométricos detallados. Estos mapas nos proporcionaron una visualización clara y concisa de las relaciones y tendencias dentro del campo de investigación, lo que nos ayudó a identificar patrones emergentes, áreas de enfoque y colaboraciones entre investigadores e instituciones.

La información se extrajo y exportó por la propia base de datos, que proporciona datos en un formato compatible con los resultados del software VOSviewer. Para llevar a cabo este análisis, los investigadores adoptaron etapas de elecciones en la plataforma de software, como las decisiones que determinan las opciones mostradas por VOSviewer, donde los términos se

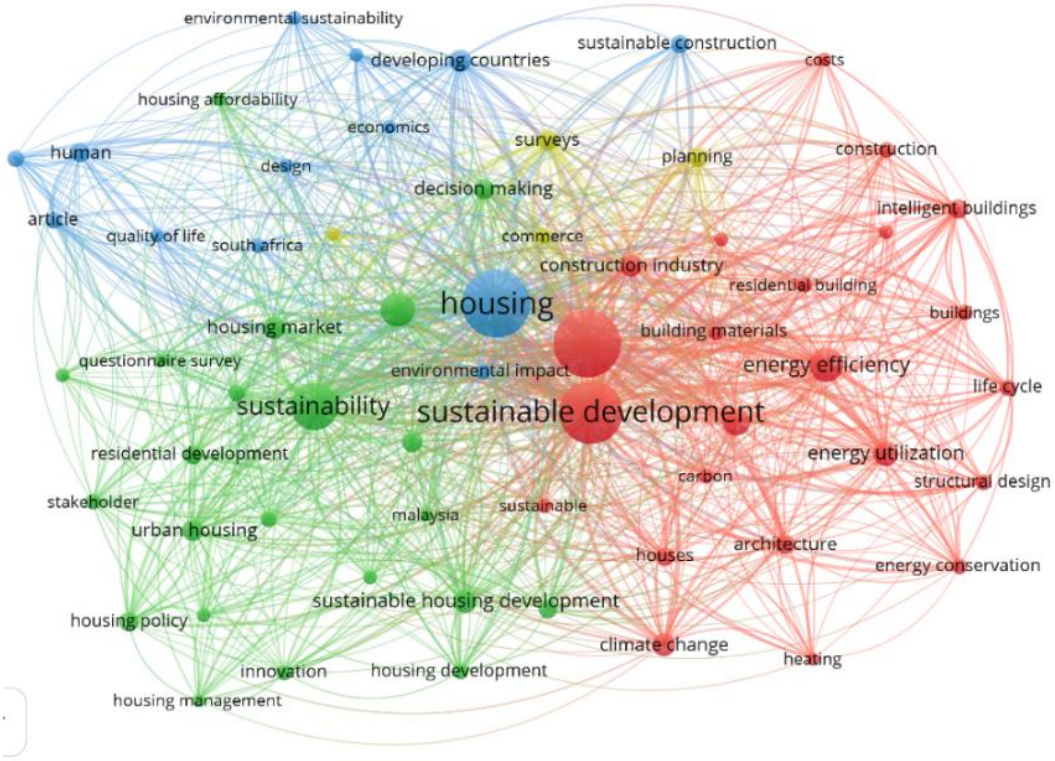
identifican en los datos de texto a través de un algoritmo de procesamiento de lenguaje natural, para recopilar la información y generar la red, permitiendo la visualización de clústeres, con características comunes en el mapa.

Además, la herramienta misma utiliza métodos de normalización de datos, garantizando la consistencia de los resultados deseados por los investigadores. VOSviewer construye mapas basados en una matriz de co-ocurrencia, y este software admite la técnica de agrupación de mapas basada en la distancia, es decir, mapas en los que la distancia entre los elementos refleja la fuerza de su relación. Por ejemplo, las distancias más pequeñas entre los elementos indican que tienen una relación más fuerte, presentando la identificación de grupos de elementos relacionados.

En la figura 5, el tamaño y el color del círculo representan la frecuencia de ocurrencia y el tipo de clúster de la palabra clave individual, la distancia entre palabras clave está representada por su co-ocurrencia relativa; por ejemplo, dos palabras clave que están cerca una de la otra co-ocurren más frecuentemente, mientras que una gran distancia entre dos palabras clave indica que no ocurren simultáneamente.

Figura 5

Red de co-ocurrencia de palabras clave.



El análisis visual generado en VOSviewer revela las interconexiones clave entre palabras clave centrales en el ámbito de la construcción sostenible. El gráfico destaca cuatro focos principales: "housing", "sustainable development", "sustainability", y "energy efficiency". Estos términos, cada uno crucial en su propio derecho, muestran una interrelación compleja pero integral en el contexto de avances y desafíos en investigaciones relacionadas.

"Housing", como núcleo fundamental, representa la base de la discusión, subrayando la importancia de la vivienda en la sostenibilidad global. Los avances en esta área tienden a reflejar tanto los cambios en las prácticas constructivas como las demandas cambiantes de la sociedad en términos de comodidad, accesibilidad y seguridad.

"Sustainable development" y "sustainability" son conceptos interconectados que abarcan un espectro más amplio de consideraciones, desde la gestión de recursos naturales hasta el equilibrio entre desarrollo económico y preservación ambiental. Los avances en estas áreas tienden a impulsar innovaciones en diseño arquitectónico, materiales de construcción y prácticas de construcción, con un enfoque en la reducción del impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida de los edificios.

Finalmente, "energy efficiency" emerge como una prioridad crítica en la construcción sostenible. Los avances en eficiencia energética no solo contribuyen a la mitigación del cambio climático al reducir las emisiones de carbono, sino que también pueden traducirse en ahorros significativos a largo plazo para los propietarios y usuarios de edificios.

La relación entre estos términos en el análisis documental sugiere una convergencia de esfuerzos y enfoques en la investigación actual. Los avances en la construcción sostenible están intrínsecamente ligados a la integración efectiva de estos cuatro pilares, donde la innovación y la colaboración son clave para abordar los desafíos globales en materia de vivienda y desarrollo sostenible.

4.1.4 Perspectivas sociales de la construcción sostenible.

Se puede argumentar que las transformaciones necesarias para convertir la construcción en un sector donde la sostenibilidad ambiental y social, así como la resiliencia, estén integradas en los procesos, modelos de negocio y toma de decisiones cotidianas, son en última instancia cambios en el comportamiento humano. Aunque las perspectivas que examinan la tecnología, los procesos de planificación, las políticas y otros aspectos proporcionan conocimientos útiles, los enfoques que se centran en los actores individuales y sociales ofrecen valiosas ideas adicionales. Sin embargo, generalmente, las investigaciones sobre el individuo y el grupo social (organización, proyecto, comunidad) en el contexto de la construcción sostenible y resiliente son insuficientes. Esta sub-temática invita a presentar trabajos que utilicen teorías y métodos de las ciencias sociales para investigar el sector de la construcción.

En su artículo titulado "Barreras que inhiben la transición hacia la sostenibilidad en la industria de la construcción australiana: una investigación de las interacciones técnicas y sociales", Martek et al. (2019) aplicaron la teoría de las transiciones hacia la sostenibilidad en un estudio de grupos focales de expertos. Aunque se centra en Australia, su argumento es aplicable globalmente. Señalan el insuficiente progreso hacia la sostenibilidad en el entorno construido, a pesar de los edificios emblemáticos y los productos piloto. Critican el enfoque en la eficiencia energética cuando la sostenibilidad tiene un significado mucho más amplio. Según ellos, el enfoque actual en la regulación y los sistemas de calificación en la construcción sostenible no considera las dinámicas sociales de los 'ecosistemas' del sector. Destacan el papel crítico de los ocupantes de los edificios, a menudo pasados por alto en la investigación y la política. A partir

de su discusión con expertos en sostenibilidad, identifican múltiples barreras para el progreso, como la falta de conciencia y demanda por parte de los usuarios finales, la falta de incentivos para los compradores de viviendas para considerar la sostenibilidad, la falta de conocimiento sobre el funcionamiento de los edificios de alto rendimiento y la renuencia a invertir debido a la rápida rotación de inquilinos. A un nivel más amplio, existe inconsistencia entre regiones, un enfoque reactivo del gobierno central en lugar de liderazgo, y falta de propiedad, gobernanza, poder y visión. Ven estas ausencias como espacios que facilitan que los intereses creados compitan y desafíen el cambio hacia la sostenibilidad. Concluyen que las soluciones centradas en la tecnología, como las regulaciones y las herramientas de calificación, aunque valiosas, no son suficientes. Es necesario prestar más atención al conocimiento y la conciencia en todo el sector, especialmente para el usuario final. A nivel nacional e industrial, el liderazgo es crítico, al igual que determinar la propiedad del problema y sus componentes. Finalmente, sin la participación del usuario final, las transiciones hacia la sostenibilidad seguirán avanzando lentamente en lugar de lograr el rápido progreso necesario.

El artículo de Heffernan y de Wilde (2020), "Viviendas autoconstruidas en grupo: un enfoque desde abajo hacia arriba para viviendas ambiental y socialmente sostenibles", aborda directamente los desafíos a nivel de consumidor resaltados por Martek et al. (2019). Heffernan y de Wilde (2020) exploran la autoconstrucción en grupo, en el contexto del Reino Unido, como un modelo de desarrollo potencialmente progresivo para viviendas de cero carbono y comunidades sostenibles. Aplicaron el método Delphi de políticas con expertos del sector a nivel nacional y regional. Entre las percepciones sobre las ventajas de la autoconstrucción en grupo, la eficiencia energética y las comunidades sostenibles fueron las más apoyadas. Otras ventajas

señaladas fueron la calidad de la construcción, la innovación, la satisfacción de las necesidades de los ocupantes y la asequibilidad. Las desventajas más comunes según los expertos fueron encontrar sitios adecuados, recaudar fondos y asegurar el compromiso continuo. El estudio mostró interesantes percepciones de los expertos en autoconstrucción en grupo y, en particular, demostró el potencial de este modelo de desarrollo para abordar dos de los desafíos más arraigados para las viviendas de bajo carbono discutidos por Martek et al. (2019): la brecha de rendimiento atribuible al comportamiento de los ocupantes y la necesidad de aumentar la conciencia del consumidor y la demanda del mercado para viviendas de cero carbono. Heffernan y de Wilde (2020) argumentan que las personas que se comprometen con la autoconstrucción en grupo desarrollan una mayor conciencia sobre cuestiones no solo de eficiencia energética sino de sostenibilidad en general, junto con un mayor conocimiento sobre la ciencia y la tecnología de la construcción de bajo carbono, y al hacerlo, se convierten en defensores de la construcción de bajo o cero carbono dentro de la comunidad en general.

En "Colaboración entre diseñadores y contratistas para mejorar el rendimiento energético de los edificios", Xu et al. (2019) se centran en un aspecto específico del entorno construido sostenible, el de la eficiencia energética, y examinan una relación importante dentro del 'ecosistema' de la construcción, la de diseñadores y contratistas. Revisan la literatura que ha encontrado que la falta de colaboración entre las etapas de diseño y construcción es un factor significativo que contribuye a la brecha de rendimiento energético entre el diseño y la operación, y su objetivo era examinar la lógica y naturaleza de tal colaboración. Primero realizaron entrevistas con expertos para identificar factores que podrían influir en el comportamiento colaborativo y luego aplicaron la teoría de juegos evolutiva para modelar el comportamiento

dinámico. El modelado mostró que las decisiones sobre la colaboración estaban influenciadas por tres factores: el beneficio a largo plazo de la colaboración, el costo de la colaboración y la pérdida debido a la falta de colaboración. Los participantes estaban dispuestos a colaborar si la pérdida por colaborar era menor que la pérdida por no colaborar. El artículo propone recomendaciones para fomentar la colaboración entre contratistas y diseñadores, incluidas incentivos gubernamentales para la colaboración, como la cofinanciación de esquemas de capacitación o tecnología de la información, e identificar responsabilidades. Los autores recomiendan que el método se amplíe a otros roles críticos dentro del ecosistema de la construcción como una forma de investigar las dinámicas de roles donde el acceso a los individuos y la complejidad de su trabajo diario hacen que tales estudios sean difíciles. Sin embargo, el método conlleva el riesgo de que lo que se está modelando pueda representar mal los procesos de trabajo o cognitivos, y los factores críticos aún pueden ser pasados por alto. Al igual que Martek et al. (2019), Xu et al. (2019) destacan la ausencia de responsabilidad entre los profesionales de la construcción y la naturaleza esencial de la interacción social y la colaboración.

El artículo de Killip et al. (2020), titulado "Explorando las prácticas y roles de los fabricantes y comerciantes de la construcción en el Reino Unido en relación con la renovación energética de viviendas", analiza un conjunto diferente de actores en la construcción: los "actores intermedios", en este caso, los fabricantes y comerciantes que suministran a pequeñas empresas de construcción. Los autores argumentan sobre el papel crucial del mercado de reparación, mantenimiento y mejora (RMI) en la implementación de una renovación profunda de las viviendas existentes, esencial para lograr los objetivos de política climática del gobierno del

Reino Unido. Señalan que los actores intermedios no son simplemente agentes pasivos que responden a la política o la demanda del mercado, sino que persiguen activamente sus propios objetivos. Los hallazgos muestran una compleja red de organizaciones involucradas en el suministro de productos y servicios al mercado RMI. Los autores contrastan la distancia en las relaciones entre fabricantes y usuarios finales en mercados de gran volumen con los vínculos mucho más cercanos entre fabricantes, comerciantes y usuarios en el RMI "verde". En este último contexto, los actores intermedios mantenían interés en el rendimiento operativo del edificio, a diferencia de los fabricantes y sus comerciantes en los mercados convencionales, que veían esto fuera de su control y responsabilidad. Se discuten los desafíos para la política que presentan estos hallazgos y se propone un proceso iterativo y centrado en el aprendizaje con la participación de actores de la industria como una forma de avanzar significativamente en la renovación de las viviendas existentes.

En un contexto diferente, el artículo de Celentano et al. (2020), titulado "La ciudad informal como un sistema sociotécnico: gestión de la construcción y distribución de dinero en las comunidades informales y mejoradas de Bangkok", se enfoca en actores centrales del desarrollo: los propietarios de viviendas y las comunidades locales. El escenario son dos asentamientos informales en Bangkok, Tailandia. Observando que el desarrollo informal no es necesariamente caótico, sino que sigue sus propios principios organizativos, Celentano et al. (2020) argumentan que comprender estos principios es esencial antes de considerar cómo las lógicas de planificación organizadas formalmente pueden integrarse con éxito. Al examinar los asentamientos de estudio de caso en cuanto a características técnicas, principales esquemas organizativos de la construcción, su interrelación y relación con la distribución de materiales,

recursos financieros y mano de obra, encontraron que, contrariamente a las suposiciones ampliamente difundidas, solo el 18% de las mejoras fueron autoconstruidas. Para estos proyectos, los materiales y la mano de obra provenían de la comunidad y la inversión se mantenía en un circuito cerrado. Los proyectos autogestionados recurrían a la mano de obra comunitaria, mientras que los materiales se obtenían de Bangkok formal y la inversión comenzaba a salir del área. Cuando se contrataban contratistas externos, los materiales y la mano de obra venían de fuera de la comunidad, lo que en algunos casos conducía al empleo de trabajadores migrantes ilegales que luego creaban sus propios asentamientos informales temporales, además de la pérdida de conocimiento sobre materiales locales por parte de la mano de obra local.

Continuando con la exploración de relaciones críticas en el desarrollo de un entorno construido sostenible, en "Conflictos en proyectos de construcción bajo el desafío de la producción más limpia: estudio de caso sobre proyectos financiados por el gobierno", Wang et al. (2019b) examinan un aspecto problemático de la construcción: los conflictos entre proyectos de construcción y partes interesadas externas. Tomando como dominio significativo a nivel nacional y global los proyectos financiados por el gobierno en China, realizaron una investigación de estudio de caso en seis proyectos. Definieron seis tipos de partes interesadas externas y 17 tipos de conflictos. Encontraron dificultades particulares con las compañías de servicios públicos y debido a políticas gubernamentales inconsistentes. Las recomendaciones para manejar el conflicto incluyen prevención, resolución activa, mediación y compromiso. La evidencia apunta a la importancia de una comunicación temprana y continua, diseñada para ser efectiva para su audiencia. Aunque el contexto empírico eran proyectos financiados por el

gobierno en China, los hallazgos se aplican más ampliamente, al menos en parte. El conflicto en los proyectos de construcción se considera casi inevitable (Jaffar et al., 2011) y, como señalan Wang et al. (2019b), los requisitos ambientales pueden llevar a una mayor contención entre las partes interesadas externas y el desarrollo. Curiosamente, el artículo hace referencia a la "cara oscura" de la construcción, señalando la ausencia de actividad ilegal y la opinión de un participante de que la violencia ya no es apropiada "nunca más" en los reasentamientos. Estos comentarios sirven como recordatorio de que gran parte de la investigación sobre la construcción se centra en las organizaciones responsables que desean aprender, mejorar y minimizar sus impactos adversos. Sin embargo, el entorno construido también es producido por individuos y organizaciones que persiguen el lucro sobre las preocupaciones éticas.

Partiendo de la premisa de que los propietarios y líderes empresariales juegan un papel fundamental en las transiciones hacia la sostenibilidad, Fontana (2019) examinó cómo los ejecutivos de la industria de la confección en Bangladesh interpretan las decisiones sobre locales certificados por LEED en su artículo titulado "Innovación ambiental pionera en países en desarrollo: el caso de la adopción de Leadership in Energy and Environmental Design por parte de ejecutivos". LEED es un esquema de evaluación ambiental y certificación de edificios originario de EE. UU. y utilizado en todo el mundo. La industria de la confección de Bangladesh es la segunda más grande del mundo después de China y sufrió problemas reputacionales importantes después del colapso de Rana Plaza en 2013, en el que murieron más de 1100 personas. Aplicando la perspectiva teórica de la interpretación y abordando la brecha en la investigación sobre la innovación ambiental en países de ingresos bajos y medios (PIBM), Fontana (2019) adoptó un enfoque cualitativo con propietarios de empresas que habían buscado

la acreditación LEED. Encontró evidencia de influencia social y colectiva en sus decisiones. La búsqueda de beneficios empresariales y objetivos ambientales jugó un papel, siendo ambos objetivos importantes para un tercio de los participantes, y ninguno importante para otro tercio. Para este último grupo, justificaron su decisión mediante la referencia a evitar pérdidas competitivas futuras y a las normas de grupo en el sector. El artículo concluye que la evidencia apoya influencias instrumentales y normativas, desafiando la visión de que la innovación ambiental es puramente impulsada por el mercado, y señalando factores psicológicos como el estatus y la recompensa emocional como relevantes. El artículo destaca cómo las decisiones empresariales rara vez son puramente "racionales" o tomadas en aislamiento de la cultura y los grupos sociales en los que están inmersos los tomadores de decisiones. El sentido se da por los contextos sociales que permiten o dificultan formas particulares de interpretación. El artículo es un excelente ejemplo de la contribución teórica y práctica que las perspectivas de las ciencias sociales pueden aportar al estudio de la producción más limpia.

El artículo de Badi y Murtagh (2019), titulado "Gestión de la cadena de suministro verde en la construcción", presenta una revisión sistemática de la literatura sobre la gestión de la cadena de suministro verde. Los autores mapean el trabajo existente en una matriz que distingue entre enfoques holísticos y funcionales, y entre construcción genérica y subdominios específicos. Los enfoques funcionales incluyen la adquisición, la gestión de residuos y la toma de decisiones en compras. Los subdominios específicos abarcan cemento, madera, áridos, baldosas de techo, carreteras y construcción residencial. Este mapeo demuestra la amplitud y complejidad de los proyectos de construcción y la necesidad de investigación a múltiples niveles, tanto específica de temas y subdominios como holísticamente. El artículo ofrece una definición actualizada y

comprensiva de la gestión de la cadena de suministro verde, distinguiendo objetivos y actividades constituyentes. Los autores argumentan que diferentes actores en el proyecto de construcción, como contratistas, subcontratistas y el equipo de diseño, tienen diferentes responsabilidades en la gestión de la cadena de suministro verde. Proponen una agenda de investigación futura que señala que las características únicas de la construcción requieren enfoques de investigación personalizados y una perspectiva de extremo a extremo a lo largo de la cadena de suministro del entorno construido. Badi y Murtagh (2019) sostienen que la sostenibilidad no puede ser entregada por un solo actor de forma aislada y que enfoques integradores como la gestión de la cadena de suministro son esenciales. Finalmente, señalan la necesidad de más teoría sobre la gestión de la cadena de suministro en la construcción y, en particular, la necesidad de enfoques más críticos.

Solaimani y Sedighi (2020), en su revisión de la literatura titulada "Hacia una visión holística de la construcción sostenible lean: una revisión de la literatura", examinan artículos publicados entre 1998 y 2017 para evaluar cómo la construcción lean contribuye a la sostenibilidad. Utilizan un diagrama de bucle causal para representar las múltiples interrelaciones entre conceptos y procesos que influyen en las dimensiones ambiental, social y económica de la construcción. Concluyen que casi todos los principios y técnicas lean tienen el potencial de contribuir positivamente a una mayor sostenibilidad en todas las fases de la construcción, aunque los compromisos entre diferentes dimensiones de la sostenibilidad son inevitables. Solaimani y Sedighi (2020) hacen eco del argumento de Badi y Murtagh (2019) de que el esfuerzo colaborativo a través de la cadena de suministro es esencial. Los enfoques lean pueden ayudar a

optimizar el rendimiento de la sostenibilidad a lo largo de la cadena y se deben reconocer las influencias recíprocas entre los stakeholders.

Salas y Yepes (2019) abordan la gestión de la relación a lo largo de la cadena de suministro completa en su artículo "MS-ReRO y métodos D-ROSE: evaluación de la incertidumbre relacional y evaluación de riesgos y oportunidades de escenarios en sistemas de infraestructura multiescala". Utilizando un marco de apoyo a la decisión para decisiones estratégicas sobre infraestructura, extendido con aplicaciones que evalúan alternativas y generan medidas de política que consideran tanto riesgos como oportunidades, aplicaron los modelos a ciudades españolas como estudio de caso. Los planes resultantes de infraestructura urbana ofrecen orientación a los tomadores de decisiones políticas en la evaluación de riesgos y oportunidades de alternativas de planificación ante escenarios extremos, enriqueciendo las conceptualizaciones actuales de la resiliencia. Aunque se necesita más desarrollo de los modelos para extender su capacidad de optimización de múltiples objetivos y la ponderación relativa de riesgos y oportunidades, esto representa un avance valioso en el apoyo a la decisión automatizado. Al incorporar la evaluación de la vulnerabilidad urbana en la planificación de infraestructuras urbanas, la resiliencia se convierte en parte de los procesos de planificación.

El artículo de Mulholland et al. (2019), titulado "Dinámicas espacio-temporales del valor social: lecciones aprendidas de dos estudios de caso de desmantelamiento nuclear en el Reino Unido", examina el valor social. Tomando como estudios de caso el desmantelamiento de dos sitios nucleares en el Reino Unido, los autores argumentan que el fin de la vida útil de las instalaciones energéticas es un área que merece más investigación. Revisan las definiciones

existentes de valor social y la naturaleza amorfa del concepto, a pesar de su incorporación en la ley del Reino Unido. Distinguen entre el valor social como un enfoque estratégico y el valor social como un indicador de rendimiento, argumentando que ambos marcos pueden influirse mutuamente. Su estudio proporciona una base empírica para demostrar la naturaleza dinámica y situada del valor social, cuyo significado puede cambiar con el tiempo y variar según el lugar.

Goel, Ganesh y Kaur (2019) examinan el estado de la investigación académica sobre la integración de la sostenibilidad en la gestión de proyectos de construcción en su artículo "Integración de la sostenibilidad en la gestión de proyectos de construcción: un análisis morfológico de más de dos décadas de literatura de investigación". Encuentran que la integración puede estar a nivel de contenido o de proceso. La investigación hasta la fecha se ha centrado en contenidos como materiales y tecnologías de construcción más que en procesos. Tras mapear la literatura desde la década de 1990, aplican el método de análisis morfológico para identificar dimensiones subyacentes. Encuentran siete dimensiones en la literatura: motivaciones, orientación a las partes interesadas, contexto organizacional, etapa del ciclo de vida del proyecto, beneficios, barreras y riesgos, y documentan 31 variantes de las siete dimensiones. El método también permite una derivación sistemática de áreas no cubiertas y se señalan más de 200 brechas. El artículo ofrece ideas para los profesionales, llamando su atención sobre las dimensiones y variantes que pueden ser relevantes para su contexto. Para los académicos en el área, es una síntesis rica del trabajo realizado hasta la fecha, con muchas oportunidades identificadas para futuras investigaciones.

4.2 Identificar las tecnologías y materiales más relevantes para la construcción sostenible y determinar cómo pueden ser aplicados de manera efectiva en el contexto de países en desarrollo, tomando como estudio de caso el contexto colombiano.

4.2.1 Contexto

La crisis ambiental derivada de los procesos industriales ha incrementado la necesidad de adoptar modelos de edificaciones sostenibles que reduzcan el impacto ambiental. En respuesta al compromiso global para mitigar los daños ecológicos, cada país ha comenzado a desarrollar e implementar tecnologías que disminuyan la degradación ambiental provocada por el sector de la construcción.

Italia, por ejemplo, ha avanzado notablemente en viviendas sostenibles, destacándose con una edificación en la campiña de Véneto que consume apenas 25 kW/m² de energía. Además, esta construcción emite un 60% menos de CO2, utiliza luces LED y reutiliza el 100% del agua de lluvia para sanitarios, grifos y riego de jardines. Este proyecto fue pionero en recibir la certificación LEED (Líder en Eficiencia Energética y Diseño Sostenible).

En 2003, Malasia realizó un estudio que evaluó los costos de inversión en edificaciones sostenibles. Se concluyó que, aunque la inversión inicial es un 2% mayor que en construcciones tradicionales, el ahorro se refleja en el mantenimiento y la reducción de los costos de servicios públicos.

En América Latina, varios países como Argentina, Brasil, Colombia, Chile, México, Perú, Guatemala, Panamá y Costa Rica han implementado políticas públicas para fomentar la construcción sostenible. Brasil, en particular, ocupa el cuarto lugar mundial en certificaciones LEED. Un ejemplo notable es el conjunto residencial Paraisópolis, que ha incorporado sistemas de uso eficiente del agua, eficiencia energética y materiales de bajo impacto ambiental, lo que le valió el segundo lugar en los premios Holcim 2012 y la certificación oro por CAIXA en 2014, cumpliendo con 39 de los 46 criterios de la metodología Selo Azul Caixa.

Chile ha desarrollado un proyecto con más de 70 viviendas térmicamente acondicionadas, logrando una reducción del consumo energético entre un 20% y un 30%, gracias al acondicionamiento térmico y al uso de energías renovables. Esto demuestra un avance significativo en sostenibilidad en el sector de la construcción, beneficiando a la población más vulnerable.

México, en su estrategia nacional, ha asumido varios compromisos bajo el Protocolo de Kioto y ha implementado cinco planes para combatir el cambio climático. Estos planes buscan optimizar los niveles de eficiencia energética mediante su mejor aprovechamiento.

Colombia también ha avanzado significativamente, implementando el Plan de Acción Sectorial de Mitigación para el Sector Vivienda y Desarrollo Territorial, que promueve la construcción sostenible con el objetivo de minimizar los efectos del cambio climático y mejorar la calidad de vida de los habitantes. En 2011, la Universidad de los Andes llevó a cabo un estudio para estimar la curva de costos de abatimiento de emisiones de gases de efecto

invernadero en el sector de vivienda urbana, concluyendo que mejores diseños de viviendas y nuevos materiales pueden optimizar el uso de energía.

Además, Colombia cuenta con una Guía de Construcción Sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones, que forma parte del Anexo 1 de la Resolución. Esta guía establece estrategias para promover la eficiencia energética y la conservación del agua, con el objetivo de reducir el consumo en al menos un 15% en nuevas construcciones, considerando los diversos climas del país.

El Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES) y el Departamento Nacional de Planeación (DNP) de Colombia han planteado estrategias para disminuir los efectos negativos en el medio ambiente a lo largo del ciclo de vida de las edificaciones.

4.2.2 Tecnologías sostenibles en la construcción.

La construcción sostenible es la práctica de mejorar la eficiencia de los edificios e infraestructuras, considerando no solo el uso de energía, agua y materiales, sino también el emplazamiento donde se ubicarán, con el objetivo principal de reducir el impacto ambiental y en la salud humana a lo largo de todo el ciclo de vida del edificio (diseño, construcción, operación, mantenimiento y demolición). Otro objetivo importante es reducir los costos de construcción y mantenimiento de los edificios. Mejorar los diseños convencionales actuales, las prácticas y estándares de construcción, extender la vida útil del edificio haciéndolo más duradero y eficiente, minimizar sus costos operativos, aumentar su productividad y proporcionar un entorno de vida y

trabajo más saludable para sus ocupantes, deberían ser las aspiraciones de aquellos en el sector de la arquitectura, ingeniería y construcción (AEC).

Las suposiciones normativas que guían la investigación sobre la construcción sostenible están siendo cada vez más reconocidas. Esto es particularmente cierto en la investigación sobre métodos de construcción sostenible, que busca aprovechar el conocimiento de diversos cuerpos científicos, del entorno construido y de la ingeniería. Mientras el cambio es una constante en la sociedad humana, la amplitud y el ritmo del cambio se han intensificado en las últimas décadas. Internacionalmente, ha habido convulsiones económicas, políticas, tecnológicas y sociales. El cambio se ha extendido incluso a cómo se percibe, acepta o rechaza la información en lo que se ha denominado la ‘era post-verdad’. Nacionalmente también ha habido cambios y desarrollos significativos en la sociedad. Y más allá de todo esto, el cambio climático ya está impactando a individuos y comunidades, negocios y gobiernos. La investigación debe responder a estos contextos nacionales e internacionales rápidamente cambiantes, mientras reconoce su propio potencial agencial para el cambio transformacional.

El artículo de Cianciarullo (2019), titulado "Green Construction-Reduction in environmental impact through alternative pipeline water crossing installation", investiga los impactos ambientales y sociales que puede generar la construcción de tuberías que atraviesan el país. El artículo ofrece una metodología de construcción de mejores prácticas, basada en un proyecto 'vivo' que reemplaza equipos pesados y contaminantes por motores eléctricos simples, abordando la implementación de una producción más limpia. Proporciona una guía para calcular el impacto de la contaminación y medir el beneficio directo de este proceso de instalación

alternativo para la sociedad. El estudio de un solo proceso de construcción logró la reducción de más de 12 toneladas de emisiones de CO2 a la atmósfera. Si consideramos que este es solo uno de los numerosos procesos de construcción que se llevan a cabo todos los días en todos los países, los hallazgos nos invitan a imaginar lo que se podría lograr en otros métodos de construcción en todo el mundo aplicando una perspectiva similar.

Un segundo artículo que consideró el impacto ambiental más amplio de los procesos de construcción, así como la tecnología, fue el de Barutha et al. (2019), titulado "Evaluating Commercial Feasibility of a New Tall Wind Tower Design Concept using a Stochastic Levelized Cost of Energy Model". Examinaron el potencial de torres hexagonales de concreto prefabricado para reemplazar las torres de acero típicamente en uso. Su estudio demostró que las torres hexagonales de concreto prefabricado permitirían torres más altas (de los actuales 80m hasta 140m), lo que daría acceso no solo a recursos eólicos más fuertes y frecuentes, sino también a regiones mucho más amplias para la instalación rentable en Estados Unidos. Además, el diseño abordaría los desafíos logísticos y de transporte.

El trabajo de investigación de Lam et al. (2019) aborda el impacto de la sostenibilidad de los residuos de construcción en su artículo "Methodology for Upstream Estimation of Construction Waste for New Building Projects". Los autores utilizan Hong Kong como su contexto de investigación, destacando los problemas de que los residuos no inertes aún van a los vertederos y señalando que estos sitios están alcanzando rápidamente su capacidad. Argumentan que, para gestionar y reducir los residuos de construcción que van a los vertederos, es esencial una cuantificación adecuada de los residuos de construcción. Utilizan tres estudios de caso para

demostrar cómo la información de diseño en la documentación del proyecto, incluidos los contratos y licitaciones, puede informar la estimación de los volúmenes de residuos y cómo esto puede tener un efecto significativo en la generación de residuos en el sitio.

En su artículo "Characterizing urban building metabolism with a 4D-GIS model: A case study in China", Wang et al. (2019a) utilizan un enfoque de estudio de caso para caracterizar el metabolismo urbano de edificios utilizando un modelo 4D-GIS. Específicamente, ofrecen un estudio de caso de China - la aldea de Longwu en la ciudad de Shenzhen. Su modelo mostró patrones urbanos espacio-temporales y cómo evolucionaba el metabolismo material de los edificios, basándose en el análisis de stock y flujos de materiales en combinación con sistemas de información geográfica (GIS). Los autores señalan que el uso y desarrollo de modelos 4D-GIS tienen el potencial de mejorar los proyectos de regeneración urbana, reduciendo el consumo de materiales y aumentando las tasas de reciclaje de residuos de construcción. Además, el enfoque podría extenderse a la planificación regional y de ciudades.

La construcción sostenible es la práctica de mejorar la eficiencia de los edificios e infraestructuras, considerando no solo el uso de energía, agua y materiales, sino también el emplazamiento donde se ubicarán. El objetivo principal es reducir el impacto ambiental y en la salud humana a lo largo de todo el ciclo de vida del edificio (diseño, construcción, operación, mantenimiento y demolición). Otro objetivo importante es reducir los costos de construcción y mantenimiento de los edificios. Mejorar los diseños convencionales actuales, las prácticas y estándares de construcción, extender la vida útil del edificio haciéndolo más duradero y eficiente, minimizar sus costos operativos, aumentar su productividad y proporcionar un entorno de vida y

trabajo más saludable para sus ocupantes, deberían ser las aspiraciones de aquellos en el sector de la arquitectura, ingeniería y construcción (AEC).

Las suposiciones normativas que guían la investigación sobre la construcción sostenible están siendo cada vez más reconocidas. Esto es particularmente cierto en la investigación sobre métodos de construcción sostenible, que busca aprovechar el conocimiento de diversos cuerpos científicos, del entorno construido y de la ingeniería. Mientras el cambio es una constante en la sociedad humana, la amplitud y el ritmo del cambio se han intensificado en las últimas décadas. Internacionalmente, ha habido convulsiones económicas, políticas, tecnológicas y sociales. El cambio se ha extendido incluso a cómo se percibe, acepta o rechaza la información en lo que se ha denominado la ‘era post-verdad’. Nacionalmente también ha habido cambios y desarrollos significativos en la sociedad. Y más allá de todo esto, el cambio climático ya está impactando a individuos y comunidades, negocios y gobiernos. La investigación debe responder a estos contextos nacionales e internacionales rápidamente cambiantes, mientras reconoce su propio potencial agencial para el cambio transformacional.

El artículo de Muller et al. (2019), titulado "A Systematic Literature Review of Interoperability in the Green Building Information Modeling Lifecycle", examina el papel del Modelado de Información de Construcción (BIM) en la sostenibilidad a lo largo del ciclo de vida de un edificio. Argumentan que los proyectos pueden lograr una mayor sostenibilidad mediante una gestión más efectiva, respaldada por la interoperabilidad habilitada por BIM durante todo el ciclo de vida. A través de una revisión sistemática de la literatura, abordan las etapas del ciclo de vida, los problemas de interoperabilidad y los factores de sostenibilidad. Sostienen que los

procesos sistemáticos para desarrollar marcos de interoperabilidad, combinados con BIM como repositorio de datos y conocimiento, pueden contribuir significativamente a la realización de edificios sostenibles.

En el artículo "Offsite Construction: Developing a BIM-Based Optimiser for Assembly", Gbadamosi, Mahamadu, Oyedele, Akinade, Manu, Mahdjoubi y Aigbavboa (2019) argumentan a favor de la construcción fuera del sitio utilizando enfoques y tecnologías modernas. Utilizan una metodología de estudio de caso aplicando un sistema de evaluación BIM-OfA (Building Information Modelling - Optimiser for Assembly) para apoyar la consideración y selección de opciones de diseño optimizadas. Este sistema también facilita la selección de materiales y métodos de construcción basados en la funcionalidad y características. Concluyen que la adopción de tecnologías apropiadas por parte del sector AEC, con BIM ofreciendo una plataforma cada vez más efectiva para la optimización del diseño, es esencial.

Kartare y Madurwar (2020), en su artículo "Design and investigation of sustainable pozzolanic material", investigan las propiedades puzolánicas de las cenizas de calderas como una solución sostenible y rentable para la producción de cemento, lo que además tiene el efecto de minimizar las emisiones de CO2.

En "An Exploration on the Applicability of Heating Tower Heat Pump and Air Source Heat Pump Systems in Different Climatic Regions", Liu, Jiang, Zhang, Zheng, You y Wei (2019) comparan los sistemas HTHP y ASHP en cuatro regiones climáticas de China.

Desarrollaron modelos matemáticos para estos sistemas y realizaron experimentos de campo para validar empíricamente sus modelos. El modelado numérico se utilizó para analizar el consumo de energía, la eficiencia económica y del sistema de cada uno. Aunque el sistema ASHP fue superior en términos de consumo eléctrico en las cuatro regiones, otros factores variaron según la región. El estudio proporciona recomendaciones sobre consideraciones adecuadas para diferentes zonas climáticas.

Saberian et al. (2019), en su artículo "Evaluation of Permanent Deformation of a New Pavement Base and Sub-base Containing Unbound Granular Materials, Crumb Rubber and Crushed Glass", evalúan experimentalmente el comportamiento de la combinación de materiales de demolición, caucho triturado y vidrio triturado para aplicaciones de base y sub-base de pavimentos. Se aplicaron 100,000 ciclos de carga a las muestras para evaluar la deformación permanente. Los hallazgos muestran que la mezcla de estos materiales de desecho podría ofrecer una solución viable y aceptable, proporcionando una alternativa baja en carbono a los materiales existentes.

En "Performance-based design of 100% recycled hot-mix asphalt and validation using traffic load simulator", Zaumanis et al. (2019) comparten su investigación sobre el diseño de mezclas asfálticas recicladas al 100% y su validación mediante un simulador de carga de tráfico. Se probaron cinco modificaciones diferentes de una mezcla de superficie para determinar si los métodos elegidos eran apropiados y cómo las mezclas recicladas se desempeñaban en comparación con el asfalto convencional. El estudio concluye que la metodología basada en el

rendimiento puede usarse para diseñar asfalto reciclado al 100% y que es seguro aplicarlo en carreteras públicas.

En las últimas décadas, las preocupaciones ambientales se han vuelto cada vez más apremiantes para las empresas y los gobiernos, especialmente a la luz del movimiento juvenil más reciente en todo el mundo. Es acertado que se ponga más énfasis en ampliar el enfoque más allá del impacto ambiental del sitio de construcción para considerar las cargas de productos de construcción de manera más general. Mientras tanto, muchas empresas privadas y/o sus respectivos grupos de investigación vinculados han comenzado a enfatizar la información ambiental, compartiendo esta información en forma de declaración ambiental de producto (EPD). Para abordar la agenda de cambio, esto necesita tener un impacto más significativo.

Para muchas personas, el término "Construcción Verde" evoca imágenes de 'eco-lujos' o soluciones tecnológicas. Se espera que materiales naturales, techos verdes y diseño pasivo también sean vistos cada vez más como contribuyentes importantes a edificios más sostenibles. Sin embargo, tal comprensión e imágenes pueden no atraer a los principales interesados y tomadores de decisiones en la construcción. Estos interesados pueden trabajar primero desde el caso comercial y solo posteriormente considerar las percepciones más amplias de los edificios, por lo que los aspectos comerciales y estéticos del edificio verde son elementos críticos para lograr consenso. El proceso de entrega de edificios e infraestructura verdes puede diferir del 'negocio habitual' y puede incluir materiales, sistemas o procesos no estándar. Aumentar la eficiencia en el uso de energía, agua y materiales y disminuir los impactos adversos de los edificios en la salud humana y el medio ambiente se puede lograr mediante una mejor

contextualización del edificio o infraestructura propuesta, su diseño, construcción, operación, mantenimiento y desmantelamiento al final de su ciclo de vida. Cuando se calculan costos holísticos y realistas a lo largo de toda la vida, está emergiendo un sólido caso comercial para los edificios verdes. A medida que los mercados se desarrollan, la presión social aumenta y la investigación señala más soluciones, el caso comercial se volverá aún más convincente.

4.2.3 Construcción baja en carbono.

En un contexto donde la industria de la construcción es considerada uno de los sectores más intensivos en energía, se ha convertido en un área clave para promover la descarbonización (Lai et al., 2016). Dentro de este marco, este tema convocó trabajos concernientes al estado actual del sector de la construcción, fronteras tecnológicas, tendencias de desarrollo e impactos ambientales desde la perspectiva de las vías de baja emisión de carbono. Los temas de interés incluyeron el consumo de energía y emisiones de carbono en la construcción actual y futura; estándares de rendimiento energético y medición de mejora en la construcción baja en carbono; comportamientos de consumo baja en carbono; modelado de políticas y simulación tecnológica para la construcción baja en carbono.

Entender el estado de desarrollo de la construcción sostenible es necesario para proporcionar orientación futura. En el Análisis de Contenido Deductivo de la Investigación sobre Construcción Sostenible en India: Progreso Actual y Direcciones Futuras, Goel, Ganesh y Kaur (2019a) utilizaron el análisis de contenido deductivo como parte de una revisión sistemática de la

literatura. Describen tres desequilibrios críticos en la investigación existente sobre construcción sostenible en un contexto indio: a) un enfoque desproporcionadamente mayor en impactos ambientales sobre impactos sociales o económicos; b) predominio del entregable final del proyecto en lugar de la sostenibilidad de los procesos a través de los cuales se entregan y gestionan los proyectos; c) mayor representación en la literatura de actores internos del proyecto, como clientes y contratistas, en comparación con partes interesadas externas, como ocupantes de edificios y trabajadores de la construcción. Señalan la probabilidad de que estos sesgos existan en la literatura sobre construcción en otros países y regiones.

Para juzgar el rendimiento eficiente de la industria de la construcción desde perspectivas integrales, en Análisis de eficiencia de costos-ambiente de la industria de la construcción en China: Un enfoque de balance de materiales, Xian et al. (2019) proponen un método de análisis envolvente de datos (DEA) modificado combinado con el principio de balance de materiales (MBP) para estimar la eficiencia de costos, técnica y ambiental y la eficiencia total de costos del sector de la construcción en China. El método puede evaluar la eficiencia de asignación de insumos de energía y los costos y beneficios de combustibles alternativos. Al cuantificar los flujos de energía o materiales a través de los procesos de construcción, se aborda el problema de violar la primera ley de la termodinámica, como ha sucedido en investigaciones anteriores, evitando la estimación sesgada de la eficiencia. El estudio proporciona una forma efectiva de evaluar fuentes de energía alternativas en la construcción sostenible, donde a menudo se hacen compromisos inevitables entre resultados ambientales y económicos.

En su artículo La relación entre la eficiencia del costo del equipo pesado y la producción más limpia en la construcción, Carmichael, Shen y Peansupap (2019) desmitifican la creencia de que la reducción de emisiones de equipos pesados conlleva costos adicionales y, por lo tanto, afecta los márgenes de beneficio. Considerando operaciones de construcción específicas, su estudio muestra que minimizar el costo unitario también resulta en minimizar las emisiones unitarias. La conclusión es que los procesos de construcción más eficientes tienen un menor impacto ambiental y que las emisiones unitarias pueden reducirse sin aumentar el costo unitario. Igualmente, cuando no se alcanza un costo unitario mínimo, las emisiones son más altas de lo necesario.

Los estudios de caso pueden proporcionar una experiencia sustancial sobre edificios de baja energía y emisiones. En el artículo de Moncaster et al. (2019) Ampliando la comprensión de los edificios de bajo impacto incorporado: resultados y recomendaciones de 80 estudios de casos cuantitativos y cualitativos multinacionales, se utilizó un metaanálisis y síntesis basados en estudios de caso para investigar la disminución de la energía incorporada y las emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo de todo el ciclo de vida de los edificios (‘de la cuna a la tumba’). El artículo tuvo como objetivo abordar los problemas de brechas significativas en los resultados causados por diferencias de metodología e información insuficiente. A través de la evaluación integral de la construcción, reparación-mantenimiento-mejora y fin de vida útil de los edificios nuevos y remodelaciones, y de los materiales de construcción, se ofrecen recomendaciones específicas para los responsables de políticas, diseñadores y modeladores de análisis del ciclo de vida que informarán y ayudarán a lograr reducciones en los impactos incorporados de los edificios a lo largo de todo el ciclo de vida.

El papel del gobierno en la formulación de políticas para promover el desarrollo de ciudades de bajo carbono se examina en el artículo Cómo las políticas nacionales facilitan el desarrollo de ciudades bajas en carbono: Un estudio de China de Zhao et al. (2019). Evalúan el efecto promocional de las políticas gubernamentales en las ciudades bajas en carbono. Utilizando un marco analítico multidimensional novedoso, se analizaron críticamente las políticas nacionales en China desde 2010 hasta 2019. El análisis mostró el papel importante de las políticas nacionales en la formación de la evolución baja en carbono de las ciudades. La innovación tecnológica desempeñó un papel importante en facilitar las políticas a nivel de ciudad baja en carbono. Tomando la ciencia de la construcción, la arquitectura y la tecnología como ejemplos, las políticas exitosas han llevado a una mayor popularidad de las tecnologías y productos bajos en carbono, incluidos los edificios prefabricados y verdes.

Además de la política, la industria misma también debería buscar formas efectivas de realizar la reducción de emisiones. En el artículo de Zhang y Zheng (2020) Reducción de las emisiones incorporadas de los edificios en la fase de diseño: un estudio comparativo sobre alternativas estructuras, se compararon las emisiones incorporadas de cinco sistemas estructurales, a saber, mampostería de ladrillos, mampostería de bloques huecos, mampostería reforzada, marco de hormigón armado y estructuras de pared de hormigón armado. La evaluación utilizó un método basado en procesos aplicado al mismo diseño de edificio y a un límite de sistema unificado, asegurando la imparcialidad de la comparación. Después de una comparación exhaustiva de seguridad, costos y emisiones, se hacen recomendaciones para la práctica que involucra diseños de edificios residenciales en áreas especializadas, por ejemplo, en

regiones sísmicas, se recomiendan estructuras de marco de concreto y mampostería reforzada sobre estructuras de paredes de concreto para edificios de varios pisos.

Otro enfoque para reducir el carbono incorporado es la construcción prefabricada. En su artículo "Factores que influyen en la aplicación de la construcción prefabricada en China: desde las perspectivas de la promoción tecnológica y la producción más limpia", Wu et al. (2019) identificaron 21 factores influyentes de la literatura que agruparon en cinco grupos relacionados con el gobierno, el mercado, la industria, la tecnología y la organización. Basándose en una encuesta a 185 actores de la construcción y 15 entrevistas, el análisis encontró que el gobierno era el actor dominante. Los cinco factores más importantes encontrados en la promoción de la construcción prefabricada en China son, en orden de importancia, el bloqueo tecnológico, las políticas de incentivos, la estandarización, el costo y la mentalidad empresarial, proporcionando implicaciones útiles para los actores de la construcción prefabricada en China.

Como un aspecto importante de la construcción sostenible, lidiar de manera efectiva y económicamente viable con los residuos de construcción es necesario. A diferencia de la evaluación del desempeño económico del reciclaje de residuos de construcción, en el artículo "Un modelo para evaluar el desempeño económico de la reducción de residuos de construcción", Hao et al. (2019) consideraron el desempeño económico de estrategias y medidas de reducción de residuos en las tres fases de generación de residuos, reducción en el sitio y eliminación de residuos. Al establecer un modelo de dinámica de sistemas, se identificaron cuatro estrategias para promover el desempeño económico de la reducción de residuos de construcción: mejorar la clasificación de residuos, reducir la disposición ilegal, introducir incentivos gubernamentales

para el reciclaje y aumentar los cargos de vertido. Este estudio proporciona una base cuantitativa para la elección de estrategias, lo que lleva a una consideración más efectiva de la eliminación de residuos de construcción.

El gas para calefacción residencial es una parte significativa del consumo de energía operativa en el entorno construido. En el artículo "¿El conocimiento y la aceptación de una política de tarifas crecientes fortalecen la intención de ahorro de gas de los residentes? Evidencia de datos de encuestas a nivel de hogares", Li et al. (2019) utilizan modelos logit y probit para examinar los cambios en la intención de ahorro de gas y las características de consumo debido a diferentes niveles de conocimiento sobre la política de tarifas crecientes para el gas doméstico (IBTsPHG, por sus siglas en inglés). Los resultados muestran varias relaciones interesantes: el conocimiento de los residentes sobre el IBTsPHG está significativamente relacionado positivamente con la intención de ahorro de gas; el precio promedio del gas está negativamente relacionado con la voluntad de aceptar el IBTsPHG; los hogares más acomodados tienen una menor voluntad de aceptar el IBTsPHG que los hogares menos acomodados; y los hogares con calderas de gas montadas en la pared tienen un mayor consumo de gas y una mayor intención de ahorro de gas pero una menor voluntad de aceptar el IBTsPHG. Además, hubo relaciones significativas entre la intención de ahorro de gas y las características del hogar, incluida la educación, la ocupación y el área del piso.

Los artículos en este tema demuestran que reducir tanto los costos como las emisiones en el sector de la construcción es viable. Las lecciones aprendidas de la experiencia existente de otros países constituyen contribuciones valiosas para informar políticas y estrategias. Para

promover el proceso de construcción con bajas emisiones de carbono, se considera esencial contar con políticas de apoyo e incentivos gubernamentales, y son necesarias la innovación en tecnología y materiales y los avances en diseño. Investigaciones y medidas detalladas y especializadas para procesos específicos son más efectivas para reducir las emisiones del sector de la construcción que los enfoques más genéricos. En las etapas posteriores del ciclo de vida de producción, los comportamientos de los ocupantes del edificio tienen efectos significativos y las políticas deben abordar este impacto. Para realizar una construcción con bajas emisiones de carbono, se necesita una consideración integral de los efectos mutuos de diferentes partes interesadas, incluidas aquellas involucradas tanto en la producción como en el consumo, y el trabajo conjunto del gobierno y la industria.

4.2.4 Tecnologías limpias en la construcción

Las tecnologías limpias en la construcción para la sostenibilidad ambiental representan un conjunto diverso de enfoques innovadores que están cambiando radicalmente la forma en que concebimos y desarrollamos edificaciones. Estas soluciones no solo buscan reducir el impacto ambiental de la construcción, sino también mejorar la eficiencia, la calidad de vida de los ocupantes y la viabilidad económica a largo plazo de los proyectos (Werner, 2013).

La eficiencia energética es un pilar fundamental en este contexto. Más allá de simplemente reducir los costos operativos a lo largo del tiempo, la implementación de tecnologías como sistemas de iluminación LED, aislamiento térmico avanzado y sistemas de

climatización eficientes tiene un impacto significativo en la reducción del consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero. Estas tecnologías están diseñadas para optimizar el rendimiento energético de los edificios, minimizando así su huella ambiental y contribuyendo a la lucha contra el cambio climático (Martínez-Rocamora et al., 2017).

La integración de fuentes de energía renovable es otro aspecto clave en la construcción sostenible. La adopción de tecnologías como paneles solares y turbinas eólicas no solo reduce la dependencia de fuentes de energía no renovables, sino que también promueve la generación de electricidad limpia y la autosuficiencia energética. Esto no solo tiene beneficios ambientales al reducir las emisiones de carbono, sino que también puede tener ventajas económicas al reducir los costos a largo plazo asociados con la energía (Dolenc & Klinc, 2017; Pasqualino et al., 2015).

El uso de materiales sostenibles es esencial para garantizar la sostenibilidad ambiental de los proyectos de construcción. Optar por materiales como maderas certificadas, concreto reciclado y productos reciclables no solo conserva los recursos naturales, sino que también reduce la huella de carbono asociada con la construcción (Leiva et al., 2021; Švajlenka & Kozlovská, 2021). Además, estos materiales suelen tener un rendimiento igual o superior a sus contrapartes no sostenibles, lo que demuestra que la sostenibilidad y la calidad pueden ir de la mano.

El diseño bioclimático es otro elemento crucial en la construcción sostenible (Ali & Alzu’bi, 2017; García-Ruiz et al., 2024). Al aprovechar las condiciones climáticas locales y

aplicar estrategias como la orientación solar adecuada y la ventilación natural, los edificios pueden optimizar su eficiencia energética y mejorar la comodidad de los ocupantes. Esto no solo reduce el consumo de energía, sino que también crea entornos interiores más saludables y confortables (García-Ruiz et al., 2024).

La gestión del agua es un aspecto igualmente importante en la construcción sostenible. La implementación de sistemas de recolección de agua de lluvia, tecnologías de purificación y sistemas de riego eficientes ayuda a reducir la demanda de agua potable y a minimizar el impacto en los recursos hídricos locales. Esto es especialmente relevante en regiones donde el acceso al agua es limitado o donde hay preocupaciones sobre la escasez de agua en el futuro.

Las tecnologías BIM (Building Information Modeling) están revolucionando la forma en que se planifican, diseñan y gestionan los proyectos de construcción (Chen et al., 2017). Al crear modelos digitales tridimensionales que contienen información detallada sobre cada aspecto del edificio, estas tecnologías permiten una mejor coordinación entre los equipos, optimizando así el uso de recursos y reduciendo los errores durante la construcción. Esto no solo mejora la eficiencia de los proyectos, sino que también puede reducir los costos y los impactos ambientales asociados con la construcción (Kim, 2019).

La generación de residuos es un desafío importante en la construcción, pero también presenta oportunidades para la innovación. La adopción de sistemas de gestión de residuos eficientes, que incluyen prácticas de reducción, reutilización y reciclaje, puede ayudar a

minimizar el impacto ambiental de la construcción. Además, la promoción de una economía circular, donde los materiales se reciclan y reutilizan en lugar de desecharse, puede contribuir significativamente a la sostenibilidad a largo plazo de la industria de la construcción.

La prefabricación se destaca como una tecnología que ofrece una serie de beneficios en términos de eficiencia y sostenibilidad. Al fabricar componentes en entornos controlados, la prefabricación reduce el desperdicio de materiales y mejora la calidad de la construcción. Además, al acelerar los plazos de construcción y reducir la necesidad de transporte, la prefabricación puede ayudar a minimizar el impacto ambiental asociado con la construcción.

La integración de sensores y sistemas inteligentes en los edificios permite el monitoreo en tiempo real y la optimización del rendimiento operativo. Al ajustar automáticamente la iluminación, la climatización y otros sistemas en función de las condiciones ambientales y las necesidades de los ocupantes, estas tecnologías pueden mejorar significativamente la eficiencia energética de los edificios y reducir su impacto ambiental.

Finalmente, las tecnologías de impresión 3D están emergiendo como una herramienta prometedora en el campo de la construcción sostenible. Al permitir la fabricación de estructuras complejas de manera eficiente y con menos desperdicio de materiales, la impresión 3D tiene el potencial de revolucionar la forma en que construimos edificios. Además, al ofrecer la posibilidad de crear diseños arquitectónicos personalizados y adaptados a las necesidades

específicas de cada proyecto, la impresión 3D puede fomentar una mayor innovación y creatividad en la industria de la construcción.

4.2.5 Aplicabilidad en el contexto colombiano

Basado en lo anterior sobre construcción sostenible, podemos identificar varias tecnologías y materiales relevantes que podrían ser aplicados de manera efectiva en el contexto de países en desarrollo, como Colombia. Algunas de estas tecnologías y materiales incluyen:

1. Materiales de construcción sostenibles: Colombia cuenta con una abundancia de recursos naturales que pueden ser utilizados en la construcción sostenible. Por ejemplo, la madera certificada de bosques sostenibles puede ser una alternativa ecológica a otros materiales de construcción, como el concreto y el acero. Además, los ladrillos ecológicos fabricados con materiales reciclados o naturales, como el barro, pueden reducir el consumo de energía y las emisiones de carbono asociadas con la fabricación de ladrillos convencionales. Integrar estos materiales en la construcción puede promover la conservación de los recursos naturales y reducir el impacto ambiental.

2. Energías renovables: Colombia posee un gran potencial para el desarrollo de energías renovables, especialmente solar y eólica, debido a su ubicación geográfica y condiciones climáticas favorables. La instalación de paneles solares en edificios y la implementación de sistemas de energía eólica pueden proporcionar una fuente de energía limpia y sostenible para satisfacer las necesidades energéticas de los proyectos de construcción. Esto no solo reduce la dependencia de combustibles fósiles, sino que también contribuye

a la mitigación del cambio climático al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

3. Tecnologías de eficiencia energética: Dado el clima tropical de muchas regiones de Colombia, la implementación de técnicas de diseño pasivo, como el uso de sombreado natural, ventilación cruzada y aislamiento térmico, puede ayudar a reducir la carga térmica en los edificios y disminuir la necesidad de sistemas de climatización. Además, la adopción de sistemas de iluminación LED, electrodomésticos eficientes y sistemas de gestión energética puede mejorar la eficiencia energética y reducir los costos operativos a largo plazo de los edificios.

4. Tecnologías de agua sostenible: Colombia enfrenta desafíos en la gestión del agua debido a la variabilidad climática y la urbanización rápida. La captura y reutilización de agua de lluvia, así como el tratamiento de aguas grises para su reutilización en el riego y la descarga de inodoros, pueden ayudar a conservar los recursos hídricos y reducir la demanda de agua potable en los edificios. Estas tecnologías pueden ser especialmente relevantes en zonas urbanas donde el suministro de agua es limitado o irregular.

5. Tecnologías de construcción prefabricada: En un país con una topografía diversa y una infraestructura de transporte en desarrollo, la construcción prefabricada puede ofrecer una solución eficiente y rentable para la construcción de viviendas y edificios. La fabricación de componentes de construcción fuera del sitio y su posterior ensamblaje en el lugar de construcción pueden acelerar el proceso de construcción, reducir los residuos de

construcción y minimizar el impacto ambiental en comparación con los métodos de construcción tradicionales.

6. Tecnologías digitales y de información: La adopción de tecnologías digitales, como Building Information Modeling (BIM), drones y sensores inteligentes, puede mejorar la eficiencia y la precisión en todas las etapas del ciclo de vida del proyecto de construcción. Estas herramientas pueden ayudar en el diseño, la planificación, la gestión de proyectos y el monitoreo ambiental, lo que permite una toma de decisiones más informada y una mejor coordinación entre los diferentes actores del proyecto.

La aplicación efectiva de estas tecnologías y materiales en el contexto colombiano requiere una combinación de políticas gubernamentales sólidas, inversión en investigación y desarrollo, capacitación de profesionales del sector y colaboración entre el gobierno, el sector privado y la sociedad civil. Además, es crucial adaptar estas soluciones a las necesidades y condiciones específicas de Colombia, considerando factores como la disponibilidad de recursos, las condiciones climáticas locales y las características socioeconómicas de la población.

4.2.6 Desafíos de la construcción de viviendas sostenibles.

Las viviendas autosostenibles representan una evolución significativa dentro del paradigma de la construcción sostenible, al incorporar una serie de características y tecnologías que les permiten funcionar de manera independiente o con una reducida dependencia de fuentes externas (Khatibi, 2019; Mangold, 2019). Estas viviendas se destacan por su enfoque integral en

la minimización del impacto ambiental y la optimización de los recursos naturales. Sus principales desafíos constituyen:

- Generación de energía renovable: La incorporación de sistemas de generación de energía renovable, como paneles solares fotovoltaicos, turbinas eólicas o sistemas de energía hidroeléctrica, permite a las viviendas autosostenibles producir su propia electricidad de manera sostenible y, en algunos casos, incluso generar un excedente que puede ser devuelto a la red (Roufechaei et al., 2014).
- Captación y uso del agua: La integración de sistemas de recolección de agua de lluvia y tecnologías para el reúso y conservación del agua reduce la dependencia de fuentes externas de agua, contribuyendo así a la sostenibilidad hídrica de las viviendas autosostenibles (Al-Saffar & Younis, 2023).
- Gestión de residuos: Se implementan sistemas de gestión de residuos eficientes, como el compostaje y la clasificación de residuos para el reciclaje, con el fin de reducir la cantidad de residuos generados y promover prácticas más sostenibles en la eliminación de desechos (Oyinlola & Whitehead, 2020).
- Diseño Bioclimático: El diseño bioclimático de estas viviendas se orienta a maximizar la entrada de luz natural y optimizar la ventilación, reduciendo así la necesidad de iluminación y sistemas de climatización artificiales y aprovechando las condiciones climáticas locales para mejorar la eficiencia energética (Culwick Fatti, 2022).
- Materiales Sostenibles: La elección de materiales de construcción sostenibles y ecológicos es esencial en las viviendas autosostenibles. Se prioriza el uso de materiales reciclados, de origen local y con bajos impactos ambientales en su producción,

contribuyendo así a reducir la huella de carbono asociada a la construcción (Srivastava et al., 2017).

- Autosuficiencia Alimentaria: En algunos casos, estas viviendas también incorporan prácticas agrícolas, como la creación de huertos o sistemas de cultivo vertical, para lograr cierto grado de autosuficiencia alimentaria, reduciendo la dependencia de fuentes externas de alimentos (Nadal et al., 2022).
- Sistemas Inteligentes: La automatización y el uso de sistemas inteligentes para la gestión de la energía, iluminación, seguridad y otros aspectos son comunes en las viviendas autosostenibles, contribuyendo a mejorar la eficiencia operativa y el confort de los residentes mientras se reducen los consumos energéticos (Adekunle & Nikolopoulou, 2020; Spagnoli, 2020).

En conjunto, estas características hacen de las viviendas autosostenibles ejemplos destacados de cómo la integración de tecnologías y prácticas innovadoras puede impulsar la construcción de hogares más respetuosos con el medio ambiente y autónomos en términos energéticos y de recursos (Nakamura, 2018; Satish & Brennan, 2019; Švajlenka & Kozlovská, 2018). Estas viviendas no solo representan una solución para la reducción del impacto ambiental de la construcción, sino también una oportunidad para promover estilos de vida más sostenibles y resilientes.

4.3 Evaluar el impacto potencial de la implementación de criterios de construcción sostenible en términos de reducción de consumo de recursos naturales, emisiones de

CO2 y consumo energético en el ciclo de vida de las viviendas construidas bajo estos estándares en países en desarrollo, específicamente en Colombia.

La construcción sostenible es un enfoque holístico e integrado para el diseño, construcción y gestión de edificaciones que busca minimizar el impacto ambiental, promover la eficiencia en el uso de recursos y fomentar la responsabilidad social y económica a lo largo de todo el ciclo de vida de una estructura. También se conoce como construcción verde o construcción ecológica. Los principios fundamentales de la construcción sostenible involucran la incorporación de prácticas y tecnologías que reduzcan la huella ambiental de los edificios, promuevan la eficiencia energética, utilicen materiales renovables y reciclados, mejoren la calidad del aire interior, minimicen los residuos de construcción y favorezcan la adaptación al entorno circundante (Flores & Merma Gallardo, 2022) (Winston, 2022).

La construcción sostenible se fundamenta en una serie de pilares interrelacionados que abarcan desde la eficiencia energética hasta la gestión de residuos, con el objetivo de minimizar el impacto ambiental y promover un desarrollo equilibrado y responsable. Entre estos pilares se destacan:

- Eficiencia energética: Este aspecto implica la adopción de tecnologías y prácticas que reduzcan el consumo de energía en los edificios. Esto incluye la instalación de aislamiento eficiente, sistemas de iluminación y climatización de bajo consumo, así como

el fomento del uso de energías renovables para cubrir las necesidades energéticas de las construcciones (Kabir et al., 2018; Mealla et al., 2015; Roufechaei et al., 2014).

- Selección de materiales sostenibles: La elección de materiales de construcción provenientes de fuentes renovables, recicladas o locales es fundamental para reducir la huella ambiental de los proyectos. Se busca minimizar las emisiones de carbono asociadas a la extracción, fabricación y transporte de los materiales, fomentando así prácticas más responsables y ecoamigables (Srivastava et al., 2017).
- Gestión del agua: La implementación de estrategias para la conservación del agua es esencial en la construcción sostenible. Esto incluye la recolección de aguas pluviales, la instalación de dispositivos de bajo consumo y el diseño de paisajismo que reduzca la necesidad de riego, todo ello orientado a minimizar el impacto sobre los recursos hídricos (Al-Saffar & Younis, 2023).
- Calidad del aire interior: Se busca garantizar un ambiente interior saludable mediante el uso de materiales y sistemas que mejoren la calidad del aire en los edificios. Esto implica la reducción de compuestos orgánicos volátiles (COV) y la promoción de la circulación de aire fresco, contribuyendo así al bienestar y la salud de los ocupantes (Elbreki et al., 2016; García-Ruiz et al., 2024).
- Gestión de residuos: La reducción de residuos de construcción y demolición es un aspecto clave de la construcción sostenible. Se promueve el reciclaje y la reutilización de materiales, así como la adopción de métodos constructivos que minimicen los desechos generados, con el fin de reducir el impacto ambiental asociado a la actividad constructiva (Oyinlola & Whitehead, 2020).

- Diseño orientado al entorno: Considerar el entorno circundante en el diseño arquitectónico es fundamental para maximizar la eficiencia energética y aprovechar las características naturales del sitio. Esto implica la orientación adecuada de los edificios para aprovechar la luz solar y la ventilación natural, reduciendo así la dependencia de sistemas artificiales (Culwick Fatti, 2022).
- Innovación y tecnología: La integración de tecnologías innovadoras contribuye significativamente a la sostenibilidad de los proyectos de construcción. Sistemas de automatización para la gestión eficiente de la energía y el monitoreo del rendimiento ambiental de los edificios son ejemplos de cómo la tecnología puede mejorar la eficiencia y la sostenibilidad en la construcción.

En última instancia, la construcción sostenible busca armonizar las necesidades presentes con las futuras, promoviendo un desarrollo que respete los límites del planeta y garantice un futuro habitable para las generaciones venideras (Dhumad, 2023; Evain & Imoniana, 2019). Este enfoque no solo busca minimizar los impactos negativos, sino también generar beneficios tangibles en términos de eficiencia, resiliencia y calidad de vida para las comunidades.

4.3.1 Evaluación de la implementación de criterios de construcción sostenible

Como parte de este objetivo, se han desarrollado matrices de evaluación para analizar y calificar diversas tecnologías y materiales relevantes para la construcción sostenible, con un enfoque específico en el contexto de países en desarrollo, tomando a Colombia como caso de

estudio. Las matrices consideran múltiples aspectos que son esenciales para determinar la viabilidad y el impacto de estas tecnologías en términos de sostenibilidad y eficiencia. A continuación, se explican los aspectos considerados en la evaluación:

Aspectos Considerados en la Evaluación

- Disponibilidad y acceso: Evalúa la facilidad con la que se pueden obtener e implementar las tecnologías en el mercado colombiano. La disponibilidad y acceso son cruciales para la adopción de nuevas tecnologías en cualquier contexto, especialmente en países en desarrollo donde las infraestructuras pueden ser limitadas.
- Costos iniciales: Analiza los costos asociados a la implementación inicial de las tecnologías. Los costos iniciales pueden ser una barrera significativa para la adopción de nuevas tecnologías. Es esencial evaluar si los beneficios a largo plazo justifican la inversión inicial.
- Reducción de consumo de recursos: Mide la capacidad de las tecnologías para reducir el uso de recursos naturales durante el ciclo de vida del proyecto. La reducción del consumo de recursos naturales es un objetivo principal de la construcción sostenible, contribuyendo a la preservación del medio ambiente.
- Emisiones de CO_2 a lo largo del ciclo de vida: Evalúa las emisiones de dióxido de carbono asociadas a la producción, uso y disposición de las tecnologías. Las emisiones de CO_2 son un factor crítico en el cambio climático, y es fundamental evaluar el impacto de las tecnologías en la huella de carbono total de un proyecto.

- Consumo energético a lo largo del ciclo de vida: Analiza el consumo de energía durante la producción, uso y disposición de las tecnologías. El consumo energético es un aspecto clave de la sostenibilidad. Tecnologías que consumen menos energía contribuyen a la eficiencia energética y a la reducción de costos operativos.
- Integración en proyectos de construcción: Examina la facilidad con la que las tecnologías pueden ser integradas en proyectos de construcción nuevos y existentes. La facilidad de integración determina la aplicabilidad práctica de las tecnologías en diferentes fases del proyecto.
- Eficiencia en el uso de materiales: Evalúa cómo las tecnologías optimizan el uso de materiales y reducen el desperdicio. La eficiencia en el uso de materiales es fundamental para minimizar el impacto ambiental y los costos asociados a los residuos.
- Mantenimiento y operatividad: Considera los requisitos de mantenimiento y la operatividad de las tecnologías a lo largo del tiempo. Las tecnologías deben ser sostenibles no solo en su implementación inicial, sino también durante su uso continuado.
- Impacto en la velocidad de construcción: Analiza cómo las tecnologías afectan los tiempos de construcción y la eficiencia del proyecto. La velocidad de construcción es un factor importante para los proyectos, influenciando los costos y la viabilidad del proyecto.
- Política y regulaciones: Examina el apoyo y las regulaciones gubernamentales que promueven la adopción de las tecnologías. El marco regulatorio y el apoyo gubernamental son esenciales para la adopción y escalamiento de nuevas tecnologías.

- Impacto socioeconómico: Mide el impacto de las tecnologías en términos de creación de empleo y desarrollo económico local. Las tecnologías sostenibles deben contribuir al desarrollo económico y social, especialmente en contextos de países en desarrollo.
- Adaptabilidad a diferentes contextos: Evalúa la capacidad de las tecnologías para adaptarse a diferentes condiciones regionales y climáticas dentro del país. La adaptabilidad es crucial para asegurar que las tecnologías sean efectivas en diversos entornos.

Para cada aspecto de evaluación, se asignaron puntuaciones en una escala del 1 al 5, donde:

- 1: Representa una evaluación muy baja o desfavorable.
- 2: Representa una evaluación baja.
- 3: Representa una evaluación media.
- 4: Representa una evaluación alta.
- 5: Representa una evaluación muy alta o favorable.

Las puntuaciones fueron asignadas basándose en la revisión de la literatura existente, estudios de caso específicos, y la evaluación del contexto colombiano en términos de recursos, infraestructura y regulaciones. Esta metodología permite una comparación integral y estructurada de las diferentes tecnologías y su potencial impacto en la construcción sostenible.

Inicialmente la tabla 2, muestra la evaluación realizada sobre los materiales sostenibles. La evaluación muestra que Colombia está avanzando significativamente en la adopción de materiales de construcción sostenibles, especialmente en términos de uso de materiales locales como el bambú y la guadua, que son altamente sostenibles y adaptables. Sin embargo, la implementación de prácticas de minimización de residuos y la eficiencia energética e hídrica todavía enfrentan desafíos debido a la infraestructura y la adopción desigual en diferentes proyectos. La participación de las partes interesadas es robusta, pero requiere más coordinación y apoyo gubernamental para maximizar el impacto. En general, Colombia está bien posicionado para mejorar y ampliar el uso de materiales de construcción sostenibles con un enfoque continuo en la educación, la infraestructura y las políticas de apoyo.

Tabla 2

Matriz de evaluación de materiales sostenibles

Aspecto de Evaluación	Descripción	Puntuación (1-5)	Justificación
Disponibilidad y acceso	Evaluación de la disponibilidad y acceso a materiales sostenibles.	4	Existe un creciente mercado de materiales sostenibles, aunque la disponibilidad puede variar en zonas rurales y urbanas.
Costos iniciales	Evaluación de los costos iniciales de materiales sostenibles.	2	Los costos iniciales pueden ser altos, pero los beneficios a largo plazo en términos de eficiencia y reducción de costos son significativos.
Reducción de consumo de recursos	Evaluación del impacto en la reducción del consumo de recursos naturales.	4	Los materiales sostenibles suelen requerir menos recursos naturales y son más eficientes en su uso.
Emisiones de CO2 a lo largo del ciclo de vida	Evaluación de las emisiones de CO2 durante la producción, uso y disposición de los materiales.	5	Los materiales sostenibles generalmente tienen menores emisiones de CO2 a lo largo de su ciclo de vida en comparación

			con los materiales convencionales.
Consumo energético a lo largo del ciclo de vida	Evaluación del consumo energético durante la producción, uso y disposición de los materiales.	4	Los materiales sostenibles suelen tener un menor consumo energético a lo largo de su ciclo de vida, especialmente si se consideran materiales reciclados o de bajo impacto energético.
Integración en proyectos de construcción	Evaluación de la facilidad de integración de materiales sostenibles en proyectos de construcción existentes y nuevos.	3	Los materiales sostenibles pueden integrarse bien en nuevos proyectos y, con algunos ajustes, en proyectos existentes.
Eficiencia en el uso de materiales	Evaluación de la eficiencia en el uso de materiales sostenibles, incluyendo reducción de desperdicios.	4	Los materiales sostenibles permiten una mejor gestión y uso eficiente, reduciendo el desperdicio y optimizando los recursos.
Mantenimiento y operatividad	Evaluación de los requisitos de mantenimiento y operatividad de los materiales sostenibles.	4	Los materiales sostenibles suelen requerir menos mantenimiento y tienen una mayor durabilidad.
Impacto en la velocidad de construcción	Evaluación del impacto de los materiales sostenibles en la velocidad de construcción.	3	La velocidad de construcción puede ser similar o ligeramente afectada dependiendo de la familiaridad con el uso de materiales sostenibles.
Política y regulaciones	Evaluación del apoyo y las regulaciones gubernamentales para la promoción de materiales sostenibles.	4	El gobierno colombiano está implementando políticas de apoyo, aunque su efectividad y alcance pueden variar.
Impacto socioeconómico	Evaluación del impacto socioeconómico de la implementación de materiales sostenibles, incluyendo la creación de empleos.	3	La adopción de materiales sostenibles puede generar empleos en la producción y construcción, además de mejorar la sostenibilidad y eficiencia económica.
Adaptabilidad a diferentes contextos	Evaluación de la adaptabilidad de los materiales sostenibles a diferentes contextos regionales y climáticos dentro de Colombia.	4	Los materiales sostenibles son bastante adaptables y pueden ser implementados en diversos contextos regionales y climáticos en Colombia, proporcionando

			soluciones viables tanto en áreas urbanas como rurales.

Por otro lado, la tabla 3, indica la evaluación de las energías renovables en la construcción sostenible. La disponibilidad de recursos naturales y la creciente infraestructura para energías solares y eólicas proporcionan una sólida base. Los costos iniciales, aunque significativos, se ven compensados por incentivos gubernamentales y financiamiento. Las energías renovables tienen un impacto significativo en la reducción de emisiones de carbono y pueden integrarse eficazmente tanto en nuevos proyectos de construcción como en adaptaciones de estructuras existentes. La eficiencia energética y la operatividad de estas tecnologías son altas, aunque requieren un mantenimiento especializado.

El impacto positivo en la red eléctrica y el apoyo gubernamental a través de políticas y regulaciones favorables son también factores importantes. Las energías renovables no solo contribuyen a la sostenibilidad ambiental, sino que también generan beneficios socioeconómicos, creando empleos y fomentando el desarrollo económico local. La adaptabilidad de estas tecnologías a diferentes contextos regionales y climáticos en Colombia es notable, haciendo que la transición hacia una construcción más sostenible y de bajo carbono sea viable y prometedora.

Tabla 3

Matriz de evaluación de energía renovable

Aspecto de Evaluación	Descripción	Puntuación (1-5)	Justificación

Disponibilidad y acceso	Evaluación de la disponibilidad y acceso a tecnologías de energía renovable.	3	La disponibilidad de tecnologías de energía renovable ha aumentado, aunque su acceso puede estar limitado en algunas regiones rurales.
Costos iniciales	Evaluación de los costos iniciales de implementación de tecnologías de energía renovable.	2	Los costos iniciales pueden ser altos, pero los ahorros a largo plazo en costos de energía son significativos.
Reducción de consumo de recursos	Evaluación del impacto en la reducción del consumo de recursos naturales al utilizar energías renovables.	5	Las energías renovables reducen significativamente el uso de recursos naturales no renovables.
Emisiones de CO2 a lo largo del ciclo de vida	Evaluación de las emisiones de CO2 durante la producción, uso y disposición de tecnologías de energía renovable.	5	Las energías renovables tienen muy bajas emisiones de CO2 a lo largo de su ciclo de vida, especialmente en comparación con los combustibles fósiles.
Consumo energético a lo largo del ciclo de vida	Evaluación del consumo energético durante la producción, uso y disposición de tecnologías de energía renovable.	4	El consumo energético en la producción de tecnologías renovables puede ser significativo, pero es compensado por el bajo consumo energético durante su operación.
Integración en proyectos de construcción	Evaluación de la facilidad de integración de tecnologías de energía renovable en proyectos de construcción existentes y nuevos.	4	Las tecnologías de energía renovable pueden integrarse bien en nuevos proyectos y, con algunas modificaciones, en proyectos existentes.
Eficiencia en el uso de materiales	Evaluación de la eficiencia en el uso de materiales proporcionada por tecnologías de energía renovable.	4	Las energías renovables permiten un uso más eficiente de materiales, al reducir la dependencia de combustibles fósiles y optimizar los recursos disponibles.
Mantenimiento y operatividad	Evaluación de los requisitos de mantenimiento y operatividad de las tecnologías de energía renovable.	3	Las tecnologías de energía renovable requieren mantenimiento regular, pero este es manejable con la infraestructura adecuada y personal capacitado.

Impacto en la velocidad de construcción	Evaluación del impacto de las tecnologías de energía renovable en la velocidad de construcción y tiempos de proyecto.	4	La instalación de tecnologías de energía renovable puede aumentar ligeramente los tiempos de construcción, pero los beneficios a largo plazo en eficiencia energética son significativos.
Política y regulaciones	Evaluación del apoyo y las regulaciones gubernamentales para la promoción de tecnologías de energía renovable.	4	El gobierno colombiano ha implementado políticas para apoyar la adopción de energías renovables, aunque su implementación puede variar en efectividad.
Impacto socioeconómico	Evaluación del impacto socioeconómico de la implementación de tecnologías de energía renovable, incluyendo la creación de empleos.	4	La adopción de energías renovables puede generar empleos en el sector de energía y en la construcción, además de reducir los costos energéticos y contribuir al desarrollo económico local.
Adaptabilidad a diferentes contextos	Evaluación de la adaptabilidad de las tecnologías de energía renovable a diferentes contextos regionales y climáticos dentro de Colombia.	4	Las energías renovables son adaptables a diversos contextos regionales y climáticos en Colombia, proporcionando soluciones viables tanto en áreas urbanas como rurales.

La evaluación de las tecnologías de eficiencia energética es altamente viables y beneficiosas para la construcción sostenible en Colombia, como se indica en la tabla 4. La disponibilidad y el acceso a estas tecnologías son buenos, aunque la adopción puede variar. Los costos iniciales, aunque elevados, se compensan con los ahorros a largo plazo y hay incentivos disponibles para apoyar su implementación.

Las tecnologías de eficiencia energética tienen un impacto significativo en la reducción del consumo de recursos naturales y energía, contribuyendo a la disminución de las emisiones de carbono y mejorando la sostenibilidad ambiental. Además, se pueden integrar fácilmente tanto en

nuevos proyectos de construcción como en estructuras existentes, proporcionando una mejora notable en la eficiencia energética general.

El mantenimiento y operatividad de estas tecnologías son manejables, y su impacto positivo en la red eléctrica local ayuda a estabilizar y reducir la carga en la red. El apoyo gubernamental a través de políticas y regulaciones favorables también es un factor importante que facilita la adopción de estas tecnologías.

Desde una perspectiva socioeconómica, la implementación de tecnologías de eficiencia energética genera empleo y desarrollo económico local, además de proporcionar ahorros en costos de energía. La adaptabilidad de estas tecnologías a diversos contextos regionales y climáticos en Colombia es otro punto fuerte, lo que las hace una opción viable para diferentes áreas del país.

Tabla 4

Matriz de evaluación de tecnologías de eficiencia energética

Aspecto de Evaluación	Descripción	Puntuación (1-5)	Justificación
Disponibilidad y acceso	Evaluación de la disponibilidad y acceso a tecnologías de eficiencia energética.	3	Existe una buena disponibilidad de tecnologías de eficiencia energética, aunque su acceso puede variar en zonas rurales.
Costos iniciales	Evaluación de los costos iniciales de implementación de tecnologías de eficiencia energética.	2	Los costos iniciales pueden ser altos, pero los ahorros a largo plazo en costos de energía son significativos.

Reducción de consumo de recursos	Evaluación del impacto en la reducción del consumo de recursos naturales al utilizar tecnologías de eficiencia energética.	5	Las tecnologías de eficiencia energética reducen significativamente el uso de recursos naturales al optimizar el consumo energético.
Emisiones de CO2 a lo largo del ciclo de vida	Evaluación de las emisiones de CO2 durante la producción, uso y disposición de tecnologías de eficiencia energética.	4	Las tecnologías de eficiencia energética generalmente tienen menores emisiones de CO2 a lo largo de su ciclo de vida en comparación con tecnologías menos eficientes.
Consumo energético a lo largo del ciclo de vida	Evaluación del consumo energético durante la producción, uso y disposición de tecnologías de eficiencia energética.	5	Estas tecnologías están diseñadas para reducir el consumo energético durante su uso, compensando el consumo durante la producción.
Integración en proyectos de construcción	Evaluación de la facilidad de integración de tecnologías de eficiencia energética en proyectos de construcción existentes y nuevos.	4	Las tecnologías de eficiencia energética pueden integrarse fácilmente en proyectos nuevos y, con algunas modificaciones, en proyectos existentes.
Eficiencia en el uso de materiales	Evaluación de la eficiencia en el uso de materiales proporcionada por tecnologías de eficiencia energética.	4	Las tecnologías de eficiencia energética optimizan el uso de materiales al reducir la necesidad de energía para calefacción, refrigeración e iluminación.
Mantenimiento y operatividad	Evaluación de los requisitos de mantenimiento y operatividad de las tecnologías de eficiencia energética.	4	Estas tecnologías requieren un mantenimiento regular, pero son generalmente manejables con la infraestructura y el personal adecuado.
Impacto en la velocidad de construcción	Evaluación del impacto de las tecnologías de eficiencia energética en la velocidad de construcción y tiempos de proyecto.	4	La implementación de tecnologías de eficiencia energética puede aumentar ligeramente los tiempos de construcción debido a la instalación de sistemas adicionales.
Política y regulaciones	Evaluación del apoyo y las regulaciones gubernamentales para la promoción de tecnologías de eficiencia energética.	4	El gobierno colombiano ha implementado políticas para apoyar la adopción de tecnologías de eficiencia energética, aunque su efectividad puede variar.

Impacto socioeconómico	Evaluación del impacto socioeconómico de la implementación de tecnologías de eficiencia energética, incluyendo la creación de empleos.	4	La adopción de tecnologías de eficiencia energética puede generar empleos en el sector de tecnología y construcción, además de reducir los costos energéticos y contribuir al desarrollo económico local.
Adaptabilidad a diferentes contextos	Evaluación de la adaptabilidad de las tecnologías de eficiencia energética a diferentes contextos regionales y climáticos dentro de Colombia.	4	Las tecnologías de eficiencia energética son adaptables a diversos contextos regionales y climáticos en Colombia, proporcionando soluciones viables tanto en áreas urbanas como rurales.

En la tabla 5, se indica la evaluación de las tecnologías de agua sostenible, como se aprecia estas son altamente viables y beneficiosas para la construcción sostenible en Colombia. La disponibilidad y el acceso a estas tecnologías son buenos, aunque la adopción puede variar. Los costos iniciales, aunque elevados, se compensan con los ahorros a largo plazo y hay incentivos disponibles para apoyar su implementación.

Las tecnologías de agua sostenible tienen un impacto significativo en la reducción del consumo de recursos hídricos, contribuyendo a la conservación de agua y la sostenibilidad ambiental. Además, se pueden integrar fácilmente tanto en nuevos proyectos de construcción como en estructuras existentes, proporcionando una mejora notable en la eficiencia del uso del agua.

El mantenimiento y operatividad de estas tecnologías son manejables, y su impacto positivo en la red de suministro de agua local ayuda a estabilizar y reducir la demanda en la red.

El apoyo gubernamental a través de políticas y regulaciones favorables también es un factor importante que facilita la adopción de estas tecnologías.

Desde una perspectiva socioeconómica, la implementación de tecnologías de agua sostenible genera empleo y desarrollo económico local, además de proporcionar ahorros en costos de agua. La adaptabilidad de estas tecnologías a diversos contextos regionales y climáticos en Colombia es otro punto fuerte, lo que las hace una opción viable para diferentes áreas del país.

Tabla 5

Matriz de evaluación de disponibilidad de agua sostenible

Aspecto de Evaluación	Descripción	Puntuación (1-5)	Justificación
Disponibilidad y acceso	Evaluación de la disponibilidad y acceso a tecnologías de agua sostenible.	4	Existe una buena disponibilidad de tecnologías de agua sostenible, aunque su acceso puede variar en zonas rurales.
Costos iniciales	Evaluación de los costos iniciales de implementación de tecnologías de agua sostenible.	3	Los costos iniciales pueden ser altos, pero los beneficios a largo plazo en términos de eficiencia y reducción de costos son significativos.
Reducción de consumo de recursos	Evaluación del impacto en la reducción del consumo de recursos naturales al utilizar tecnologías de agua sostenible.	5	Las tecnologías de agua sostenible reducen significativamente el uso de recursos naturales y optimizan el consumo de agua.
Emisiones de CO2 a lo largo del ciclo de vida	Evaluación de las emisiones de CO2 durante la producción, uso y disposición de tecnologías de agua sostenible.	4	Las tecnologías de agua sostenible generalmente tienen menores emisiones de CO2 a lo largo de su ciclo de vida en comparación con tecnologías convencionales.

Consumo energético a lo largo del ciclo de vida	Evaluación del consumo energético durante la producción, uso y disposición de tecnologías de agua sostenible.	4	El consumo energético en la producción de tecnologías de agua sostenible puede ser significativo, pero es compensado por el bajo consumo energético durante su operación.
Integración en proyectos de construcción	Evaluación de la facilidad de integración de tecnologías de agua sostenible en proyectos de construcción existentes y nuevos.	4	Las tecnologías de agua sostenible pueden integrarse bien en nuevos proyectos y, con algunas modificaciones, en proyectos existentes.
Eficiencia en el uso de materiales	Evaluación de la eficiencia en el uso de materiales proporcionada por tecnologías de agua sostenible.	4	Las tecnologías de agua sostenible permiten un uso más eficiente de los recursos hídricos y materiales, optimizando el consumo de agua.
Mantenimiento y operatividad	Evaluación de los requisitos de mantenimiento y operatividad de las tecnologías de agua sostenible.	4	Estas tecnologías requieren un mantenimiento regular, pero son generalmente manejables con la infraestructura y el personal adecuado.
Impacto en la velocidad de construcción	Evaluación del impacto de las tecnologías de agua sostenible en la velocidad de construcción y tiempos de proyecto.	3	La instalación de tecnologías de agua sostenible puede aumentar ligeramente los tiempos de construcción, pero los beneficios a largo plazo en eficiencia hídrica son significativos.
Política y regulaciones	Evaluación del apoyo y las regulaciones gubernamentales para la promoción de tecnologías de agua sostenible.	4	El gobierno colombiano ha implementado políticas para apoyar la adopción de tecnologías de agua sostenible, aunque su implementación puede variar en efectividad.
Impacto socioeconómico	Evaluación del impacto socioeconómico de la implementación de tecnologías de agua sostenible, incluyendo la creación de empleos.	4	La adopción de tecnologías de agua sostenible puede generar empleos en el sector de tecnología y construcción, además de reducir los costos hídricos y contribuir al desarrollo económico local.
Adaptabilidad a diferentes contextos	Evaluación de la adaptabilidad de las tecnologías de agua sostenible a diferentes	4	Las tecnologías de agua sostenible son adaptables a diversos contextos regionales y climáticos en Colombia,

contextos regionales y climáticos dentro de Colombia.	proporcionando soluciones viables tanto en áreas urbanas como rurales.

La evaluación muestra que las tecnologías de construcción prefabricada son altamente viables y beneficiosas para la construcción sostenible en Colombia, como se indica en la tabla 6. La disponibilidad y el acceso a estas tecnologías están en aumento, con una creciente industria local que apoya su adopción. Aunque los costos iniciales pueden ser elevados debido a la inversión en infraestructura y tecnología, la eficiencia en la producción en masa puede reducir estos costos a largo plazo.

La construcción prefabricada tiene un impacto significativo en la reducción del consumo de recursos naturales, optimizando el uso de materiales y minimizando el desperdicio. Estas tecnologías también se integran fácilmente en nuevos proyectos y, en algunos casos, en renovaciones y ampliaciones, mejorando la eficiencia y reduciendo los tiempos de construcción.

La eficiencia en el uso de materiales es alta, con una gestión precisa y optimizada de los recursos en la fábrica. Las estructuras prefabricadas requieren menos mantenimiento debido a la alta calidad de la fabricación, y la velocidad de construcción es significativamente mayor, lo que reduce los tiempos de proyecto.

El apoyo gubernamental y las regulaciones son favorables, aunque hay margen de mejora en algunas áreas. La construcción prefabricada genera un impacto socioeconómico positivo,

creando empleos y contribuyendo al desarrollo económico local, y es altamente adaptable a diferentes contextos regionales y climáticos en Colombia.

Tabla 6

Matriz de evaluación de construcción prefabricada

Aspecto de Evaluación	Descripción	Puntuación (1-5)	Justificación
Disponibilidad y acceso	Evaluación de la disponibilidad y acceso a tecnologías de construcción prefabricada.	4	La disponibilidad de tecnologías de construcción prefabricada ha aumentado, aunque su acceso puede estar limitado en algunas regiones rurales.
Costos iniciales	Evaluación de los costos iniciales de implementación de tecnologías de construcción prefabricada.	3	Los costos iniciales pueden ser altos, pero los ahorros a largo plazo en costos de construcción y tiempo son significativos.
Reducción de consumo de recursos	Evaluación del impacto en la reducción del consumo de recursos naturales al utilizar tecnologías de construcción prefabricada.	5	Las tecnologías de construcción prefabricada optimizan el uso de recursos naturales al reducir el desperdicio de materiales y acelerar el proceso de construcción.
Emisiones de CO2 a lo largo del ciclo de vida	Evaluación de las emisiones de CO2 durante la producción, uso y disposición de tecnologías de construcción prefabricada.	4	Las tecnologías de construcción prefabricada generalmente tienen menores emisiones de CO2 a lo largo de su ciclo de vida en comparación con los métodos de construcción tradicionales.
Consumo energético a lo largo del ciclo de vida	Evaluación del consumo energético durante la producción, uso y disposición de tecnologías	4	El consumo energético en la producción de componentes prefabricados puede ser significativo, pero es compensado por la eficiencia energética

	de construcción prefabricada.		durante la construcción y el uso de materiales.
Integración en proyectos de construcción	Evaluación de la facilidad de integración de tecnologías de construcción prefabricada en proyectos de construcción existentes y nuevos.	4	Las tecnologías de construcción prefabricada pueden integrarse bien en nuevos proyectos y, con algunas modificaciones, en proyectos existentes.
Eficiencia en el uso de materiales	Evaluación de la eficiencia en el uso de materiales proporcionada por tecnologías de construcción prefabricada.	4	Las tecnologías de construcción prefabricada permiten un uso más eficiente de los materiales, reduciendo el desperdicio y optimizando los recursos.
Mantenimiento y operatividad	Evaluación de los requisitos de mantenimiento y operatividad de las tecnologías de construcción prefabricada.	4	Estas tecnologías requieren un mantenimiento regular, pero son generalmente manejables con la infraestructura y el personal adecuado.
Impacto en la velocidad de construcción	Evaluación del impacto de las tecnologías de construcción prefabricada en la velocidad de construcción y tiempos de proyecto.	5	La construcción prefabricada puede acelerar significativamente los tiempos de construcción, reduciendo los plazos de entrega de proyectos.
Política y regulaciones	Evaluación del apoyo y las regulaciones gubernamentales para la promoción de tecnologías de construcción prefabricada.	4	El gobierno colombiano ha implementado políticas para apoyar la adopción de tecnologías de construcción prefabricada, aunque la implementación y efectividad pueden variar.
Impacto socioeconómico	Evaluación del impacto socioeconómico de la implementación de tecnologías de construcción prefabricada, incluyendo la creación de empleos.	4	La adopción de tecnologías de construcción prefabricada puede generar empleos en el sector de manufactura y construcción, además de reducir los costos y tiempos de construcción, contribuyendo al desarrollo económico local.

Adaptabilidad a diferentes contextos	Evaluación de la adaptabilidad de las tecnologías de construcción prefabricada a diferentes contextos regionales y climáticos dentro de Colombia.	4	Las tecnologías de construcción prefabricada son adaptables a diversos contextos regionales y climáticos en Colombia, proporcionando soluciones viables tanto en áreas urbanas como rurales.

En la tabla 7, se indica la evaluación de las tecnologías digitales y de información, se aprecia que estas son altamente viables y beneficiosas para la construcción sostenible en Colombia. La disponibilidad y el acceso a estas tecnologías han mejorado significativamente, aunque todavía hay desafíos en zonas rurales y de difícil acceso. Los costos iniciales de implementación pueden ser considerables, pero los beneficios a largo plazo en términos de eficiencia y reducción de costos son significativos.

Las tecnologías digitales permiten una mejor planificación y gestión de recursos, reduciendo desperdicios y optimizando el uso de materiales y energía. Estas tecnologías se integran fácilmente en nuevos proyectos y son compatibles con la mayoría de las metodologías de construcción existentes, mejorando la eficiencia y la coordinación.

La digitalización permite un seguimiento preciso de los materiales, reduciendo el desperdicio y mejorando la gestión de inventarios. Aunque las tecnologías digitales requieren mantenimiento regular y actualizaciones, estos son manejables con una infraestructura adecuada y personal capacitado.

Las tecnologías digitales pueden acelerar significativamente la velocidad de construcción al mejorar la planificación, coordinación y seguimiento de los proyectos en tiempo real. El

gobierno colombiano ha implementado políticas para apoyar la digitalización en varios sectores, incluyendo la construcción, aunque la efectividad de estas políticas puede variar.

La adopción de tecnologías digitales puede generar empleos en el sector tecnológico y en la construcción, además de mejorar la eficiencia y reducir los costos de los proyectos, contribuyendo al desarrollo económico local. Las tecnologías digitales son altamente adaptables y pueden ser implementadas en diversos contextos regionales y climáticos en Colombia.

Tabla 7

Matriz de evaluación de tecnologías digitales y de información

Aspecto de Evaluación	Descripción	Puntuación (1-5)	Justificación
Disponibilidad y acceso	Evaluación de la disponibilidad y acceso a tecnologías digitales y de información.	3	Las tecnologías digitales y de información están ampliamente disponibles, aunque su acceso puede estar limitado en algunas regiones rurales.
Costos iniciales	Evaluación de los costos iniciales de implementación de tecnologías digitales y de información.	3	Los costos iniciales pueden ser altos, pero los beneficios a largo plazo en términos de eficiencia, reducción de errores y optimización de recursos son significativos.
Reducción de consumo de recursos	Evaluación del impacto en la reducción del consumo de recursos naturales al utilizar tecnologías digitales y de información.	4	Las tecnologías digitales optimizan el uso de recursos al mejorar la planificación y gestión de proyectos, reduciendo el desperdicio de materiales y energía.
Emisiones de CO2 a lo largo del ciclo de vida	Evaluación de las emisiones de CO2 durante la producción, uso y disposición de tecnologías digitales y de información.	3	Las tecnologías digitales pueden tener emisiones de CO2 asociadas a su producción y uso, pero estas se compensan por la reducción de emisiones gracias

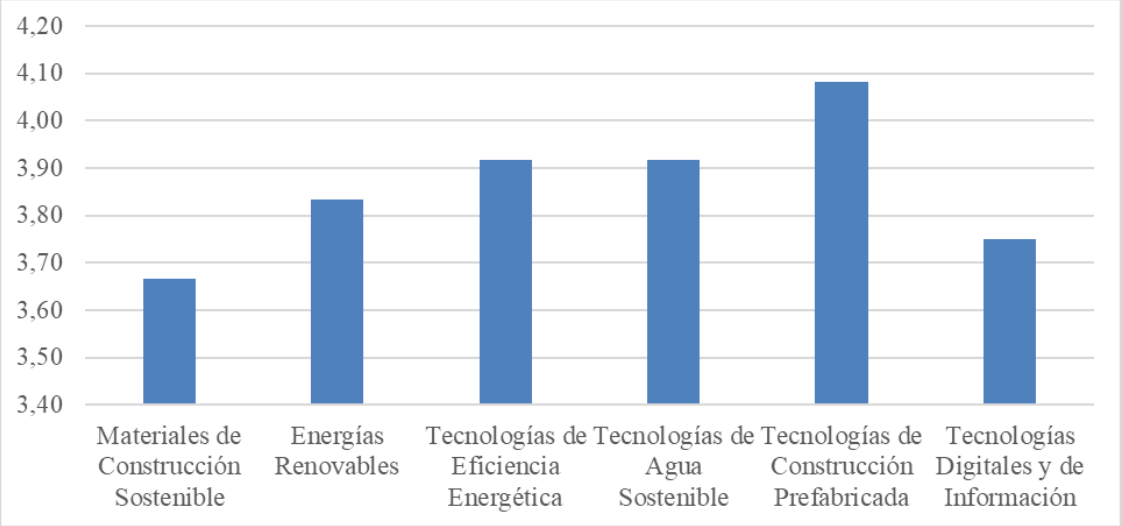
			a una gestión más eficiente de recursos y energía.
Consumo energético a lo largo del ciclo de vida	Evaluación del consumo energético durante la producción, uso y disposición de tecnologías digitales y de información.	4	El consumo energético de las tecnologías digitales puede ser significativo, pero se compensa por la optimización del uso de recursos y la reducción de errores en la gestión de proyectos.
Integración en proyectos de construcción	Evaluación de la facilidad de integración de tecnologías digitales y de información en proyectos de construcción existentes y nuevos.	4	Las tecnologías digitales pueden integrarse bien en nuevos proyectos y, con algunas modificaciones, en proyectos existentes, mejorando la gestión y eficiencia.
Eficiencia en el uso de materiales	Evaluación de la eficiencia en el uso de materiales proporcionada por tecnologías digitales y de información.	4	Las tecnologías digitales permiten una mejor gestión y uso eficiente de los materiales, reduciendo el desperdicio y optimizando los recursos.
Mantenimiento y operatividad	Evaluación de los requisitos de mantenimiento y operatividad de las tecnologías digitales y de información.	4	Estas tecnologías requieren un mantenimiento regular, pero son generalmente manejables con la infraestructura y el personal adecuado.
Impacto en la velocidad de construcción	Evaluación del impacto de las tecnologías digitales y de información en la velocidad de construcción y tiempos de proyecto.	4	La implementación de tecnologías digitales puede acelerar los tiempos de construcción al mejorar la planificación y gestión de los proyectos.
Política y regulaciones	Evaluación del apoyo y las regulaciones gubernamentales para la promoción de tecnologías digitales y de información.	4	El gobierno colombiano ha implementado políticas para apoyar la adopción de tecnologías digitales, aunque la implementación y efectividad pueden variar.
Impacto socioeconómico	Evaluación del impacto socioeconómico de la implementación de tecnologías digitales y de información, incluyendo la creación de empleos.	4	La adopción de tecnologías digitales puede generar empleos en el sector de tecnología y construcción, además de mejorar la eficiencia y reducir costos, contribuyendo al desarrollo económico local.

Adaptabilidad a diferentes contextos	Evaluación de la adaptabilidad de las tecnologías digitales y de información a diferentes contextos regionales y climáticos dentro de Colombia.	4	Las tecnologías digitales son adaptables a diversos contextos regionales y climáticos en Colombia, proporcionando soluciones viables tanto en áreas urbanas como rurales.

Los resultados de las matrices de evaluación para diferentes tecnologías y materiales de construcción sostenible indican una variación en la calificación general, lo que refleja su potencial y efectividad en el contexto colombiano. En la figura 6, se presenta un análisis detallado de cada tecnología, basándonos en sus calificaciones generales.

Figura 6

Resultados de las matrices de evaluación



Los materiales de construcción sostenible recibieron una calificación general de 3,67. Esto sugiere que, si bien tienen un impacto positivo en la sostenibilidad de la construcción, existen áreas en las que podrían mejorar. Aspectos como la disponibilidad, los costos iniciales y la integración en proyectos pueden presentar desafíos. A pesar de estas limitaciones, estos

materiales contribuyen significativamente a la reducción del consumo de recursos naturales y las emisiones de CO2 a lo largo del ciclo de vida de los proyectos de construcción.

Las energías renovables obtuvieron una calificación de 3,83, indicando su alta relevancia y efectividad en la construcción sostenible. Las energías renovables, como la solar y la eólica, son esenciales para reducir la dependencia de combustibles fósiles y disminuir las emisiones de CO2. Sin embargo, la implementación de estas tecnologías puede estar limitada por factores como los costos iniciales y la infraestructura necesaria para su adopción a gran escala.

Las tecnologías de eficiencia energética recibieron una calificación de 3,92, reflejando su gran potencial para mejorar la sostenibilidad en la construcción. Estas tecnologías, que incluyen iluminación LED, sistemas de climatización eficientes y aislamiento térmico avanzado, son cruciales para reducir el consumo energético durante la operación de los edificios. La alta calificación sugiere que estas tecnologías son relativamente accesibles y efectivas en el contexto colombiano.

Al igual que las tecnologías de eficiencia energética, las tecnologías de agua sostenible también obtuvieron una calificación de 3,92. Estas tecnologías, que incluyen sistemas de recolección de agua de lluvia, tratamiento y reutilización de aguas grises, y dispositivos de ahorro de agua, son vitales para reducir el consumo de agua y promover su uso eficiente. Su implementación puede ser relativamente sencilla y proporciona beneficios significativos en términos de conservación de recursos y reducción de costos operativos.

Las tecnologías de construcción prefabricada alcanzaron la calificación más alta, con 4,08. Esto indica que son altamente efectivas y tienen un gran potencial para transformar la industria de la construcción. La construcción prefabricada ofrece numerosas ventajas, como la reducción de desperdicios, la mejora de la calidad y la velocidad de construcción, y la disminución del impacto ambiental. Estas tecnologías son especialmente adecuadas para el contexto colombiano, donde pueden contribuir significativamente a la eficiencia y sostenibilidad de los proyectos de construcción.

Las tecnologías digitales y de información recibieron una calificación de 3,75, lo que subraya su importancia creciente en la construcción sostenible. Herramientas como el BIM (Building Information Modeling), la gestión de proyectos basada en datos y la monitorización en tiempo real pueden mejorar la planificación, ejecución y mantenimiento de proyectos de construcción. Aunque estas tecnologías son altamente beneficiosas, su adopción puede estar limitada por la necesidad de capacitación y la infraestructura tecnológica.

El análisis de las calificaciones generales de las diferentes tecnologías y materiales de construcción sostenible destaca la importancia de cada uno en la promoción de prácticas de construcción más sostenibles y eficientes en Colombia. Las tecnologías de construcción prefabricada obtuvieron la calificación más alta, seguidas de cerca por las tecnologías de eficiencia energética y de agua sostenible. Las energías renovables y las tecnologías digitales también mostraron un alto potencial, mientras que los materiales de construcción sostenible, aunque importantes, presentan algunas áreas para mejorar. Este análisis proporciona una guía valiosa para priorizar la implementación de tecnologías que pueden maximizar el impacto

positivo en la sostenibilidad y resiliencia de la construcción en contextos de países en desarrollo como Colombia.

4.4 Elaborar una guía con recomendaciones específicas y aplicables para la construcción de viviendas autosostenibles en Colombia, integrando nuevas tecnologías y buenas prácticas ambientales para la promoción de un desarrollo urbano amigable con el entorno ambiental y social.

En la creciente necesidad de reducir el impacto ambiental y fomentar prácticas de desarrollo sostenible, la construcción de viviendas autosostenibles se ha convertido en una prioridad clave. Este enfoque no solo busca minimizar el consumo de recursos naturales y las emisiones de CO_2, sino también maximizar la eficiencia energética mediante la integración de tecnologías avanzadas y sostenibles. En este sentido, la guía propuesta ofrece recomendaciones específicas y aplicables para la construcción de viviendas autosostenibles en Colombia, integrando nuevas tecnologías y buenas prácticas ambientales.

Para ilustrar estas recomendaciones, se ha desarrollado un ejemplo práctico de una vivienda unifamiliar de dos pisos. A la cual se le propone la incorporación de las tecnologías y

materiales más relevantes identificados previamente, tales como materiales de construcción sostenible, energías renovables, tecnologías de eficiencia energética, tecnologías de agua sostenible, tecnologías de construcción prefabricada y tecnologías digitales y de información. Este enfoque permitirá demostrar cómo estas innovaciones pueden contribuir significativamente a un desarrollo urbano amigable con el entorno ambiental y social en el contexto colombiano.

En el desarrollo de esta guía, se han considerado diversos aspectos clave, tales como la reducción del consumo de recursos naturales, la eficiencia energética a lo largo del ciclo de vida de la vivienda, y la integración de tecnologías que faciliten la autosostenibilidad. Al aplicar estas recomendaciones en un caso práctico, se busca proporcionar un modelo replicable que pueda ser adoptado por arquitectos, ingenieros, constructores y tomadores de decisiones en Colombia, promoviendo así un futuro más sostenible y resiliente en el ámbito de la construcción.

4.4.1 Recomendaciones constructivas para el uso de materiales locales y reciclados

En el contexto de la construcción sostenible en Colombia, el uso de materiales locales y reciclados es fundamental para reducir el impacto ambiental y fomentar la economía circular. A continuación, se presentan un conjunto de recomendaciones específicas para la construcción de una vivienda unifamiliar de dos pisos, destacando el uso de bambú, guadua y cemento con puzolana.

Bambú y Guadua

Figura 7

Vivienda con sistema constructivo en guadua



Fuente: bambu y guadua - Búsqueda Imágenes (bing.com)

Estructuras Principales:

- Columnas y Vigas: Utilizar bambú y guadua en la construcción de columnas y vigas. Estos materiales, además de ser abundantes en Colombia, ofrecen una excelente relación resistencia-peso, siendo muy flexibles y resistentes a la tracción.
- Armaduras de Techo: Emplear bambú y guadua en las estructuras del techo. La flexibilidad y resistencia a las fuerzas de compresión y tracción del bambú lo hacen ideal para techos que necesitan soportar cargas de viento y lluvia.

Acabados Interiores y Exteriores:

- Revestimientos de Paredes: Utilizar bambú y guadua para revestir paredes interiores y exteriores, proporcionando un acabado estético y natural. Estos materiales también mejoran el aislamiento térmico y acústico.

- Suelos y Techos: Instalar pisos y techos de bambú y guadua en áreas como salas de estar, comedores y habitaciones, ofreciendo durabilidad y un atractivo visual cálido.

Consideraciones Adicionales:

- Tratamiento de Materiales: Es esencial tratar el bambú y la guadua contra insectos y humedad. Métodos como el curado y el barnizado prolongan la vida útil de estos materiales.
- Capacitación y Mano de Obra: Formar a los trabajadores locales en técnicas de construcción con bambú y guadua, promoviendo el empleo y el conocimiento local.

Cemento con Puzolana

Figura 8

Cemento y puzolanas



Fuente: Cemento con Puzolana - Búsqueda Imágenes (bing.com)

Mezcla de Cemento:

- Incorporación de Cenizas Volantes: Mezclar cenizas volantes y otros materiales puzolánicos con cemento Portland para la construcción de cimientos, columnas, vigas y losas. Las cenizas volantes actúan como aglutinantes, mejorando la durabilidad y reduciendo la cantidad de cemento necesario, lo que disminuye las emisiones de CO2.
- Proporción de Mezcla: Se recomienda una proporción de 15-30% de puzolana en la mezcla de cemento para optimizar la reducción de emisiones sin comprometer la resistencia estructural.

Aplicaciones Específicas:

- Cimientos y Muros de Carga: Utilizar cemento con pozzolana para cimientos y muros de carga, garantizando una base sólida y duradera para la vivienda.
- Pisos y Losas: Aplicar esta mezcla en la construcción de pisos y losas, mejorando la resistencia al desgaste y las propiedades térmicas del concreto.

Beneficios Ambientales y Económicos:

- Reducción de Emisiones: Al reducir el contenido de cemento Portland, se disminuyen significativamente las emisiones de CO2 asociadas con la producción de cemento.

- Ahorro de Costos: El uso de materiales puzolánicos puede resultar en ahorros económicos, ya que estos materiales son generalmente más económicos que el cemento Portland.

Procedimientos de Implementación:

- Pruebas de Calidad: Realizar pruebas de calidad y resistencia para asegurar que la mezcla cumpla con los estándares de construcción.
- Capacitación Técnica: Capacitar a ingenieros y trabajadores en la correcta formulación y uso del cemento con puzolana.

Aislamiento térmico natural

Figura 9

Aislamiento termino en fibra de coco



Fuente: aislamiento termico natural fibra de coco - Búsqueda Imágenes (bing.com)

Fibra de Coco: Utilizar fibra de coco para el aislamiento térmico de paredes, techos y pisos. La fibra de coco es un material natural, biodegradable y eficiente en términos de aislamiento térmico y acústico.

Lino: Emplear lino como material de aislamiento en diversas partes de la vivienda. El lino es otro material natural que ofrece propiedades de aislamiento térmico, es biodegradable y tiene una baja huella de carbono.

Aplicaciones Específicas:

- Paredes Exteriores e Interiores: Instalar paneles de aislamiento de fibra de coco y lino en las paredes exteriores e interiores para mejorar la eficiencia energética de la vivienda y reducir la necesidad de calefacción y refrigeración.
- Techos y Suelos: Utilizar estos materiales en techos y suelos para proporcionar una barrera térmica adicional, contribuyendo al confort térmico durante todo el año.

Beneficios Ambientales y de Salud:

- Sostenibilidad: La fibra de coco y el lino son materiales renovables y biodegradables, lo que reduce el impacto ambiental de la construcción.

- Salud y Bienestar: Estos materiales no emiten compuestos orgánicos volátiles (COV), contribuyendo a un ambiente interior más saludable.

Procedimientos de Implementación:

- Instalación: Capacitar a los trabajadores en la instalación de materiales de aislamiento naturales para asegurar una correcta aplicación y maximizar su efectividad.
- Mantenimiento: Realizar inspecciones regulares para asegurar que el aislamiento se mantenga en buen estado y continúe proporcionando los beneficios esperados.

4.4.2 Recomendaciones constructivas para el uso de energías renovables

En el contexto de la construcción sostenible en Colombia, la integración de energías renovables es crucial para reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables y disminuir las emisiones de CO_2. A continuación, se presentan recomendaciones específicas para la instalación de sistemas de energías renovables, con un enfoque en la implementación de paneles solares y sistemas de calentamiento solar de agua.

Instalación de Paneles Solares

Figura 10

Paneles solares en viviendas



Fuente: paneles solares - Búsqueda Imágenes (bing.com)

Sistema Fotovoltaico:

- Evaluación del Sitio: Realizar un estudio de viabilidad para evaluar la cantidad de radiación solar recibida en el sitio específico. Esto incluye el análisis de sombras, orientación del techo y la inclinación óptima para los paneles solares.

- Selección de Paneles: Elegir paneles solares fotovoltaicos de alta eficiencia y durabilidad. Se recomiendan paneles con tecnología PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) o paneles bifaciales que aprovechan tanto la luz directa como la reflejada.
- Dimensionamiento del Sistema: Calcular el tamaño del sistema fotovoltaico necesario para cubrir una parte significativa del consumo eléctrico de la vivienda. Esto puede incluir el uso de herramientas de simulación para prever el rendimiento del sistema a lo largo del año.
- Instalación y Conexión: Instalar los paneles solares en el techo de la vivienda, asegurando una correcta fijación y orientación. Conectar el sistema fotovoltaico a un inversor que convierta la corriente continua (CC) generada en corriente alterna (CA) para uso doméstico.
- Mantenimiento: Programar revisiones periódicas y limpieza de los paneles solares para mantener su eficiencia. Incluir un monitoreo continuo del rendimiento del sistema para detectar y solucionar problemas rápidamente.

Beneficios Ambientales y Económicos:

- Reducción de Emisiones de CO2: La generación de electricidad a partir de paneles solares reduce significativamente las emisiones de CO2 comparado con el uso de combustibles fósiles.
- Ahorro en Costos de Energía: Disminuir la dependencia de la red eléctrica reduce los costos a largo plazo, especialmente en regiones con altos costos de electricidad.

- Incentivos y Subsidios: Aprovechar posibles incentivos y subsidios gubernamentales para la instalación de sistemas de energía solar, lo que puede reducir los costos iniciales de inversión.

Calentamiento Solar de Agua

Figura 11

Sistema de calentamiento de agua sostenible



Fuente: Calentamiento Solar de Agua - Búsqueda Imágenes (bing.com)

Colectores Solares Térmicos:

- Selección de Colectores: Elegir colectores solares térmicos adecuados para el calentamiento de agua sanitaria. Los colectores de placa plana y los colectores de tubos evacuados son opciones comunes que ofrecen alta eficiencia.
- Dimensionamiento del Sistema: Calcular la capacidad del sistema de calentamiento solar de agua basado en el número de ocupantes de la vivienda y el consumo promedio de agua caliente. Dimensionar el sistema para garantizar un suministro adecuado durante todo el año.
- Instalación: Instalar los colectores solares en el techo, orientados al norte para maximizar la captación solar en el hemisferio sur. Asegurar una inclinación adecuada para optimizar la eficiencia durante las diferentes estaciones del año.
- Sistema de Almacenamiento: Integrar un tanque de almacenamiento de agua caliente aislado térmicamente para mantener la eficiencia del sistema. Considerar la instalación de un sistema de respaldo que funcione con electricidad o gas para días nublados o de alta demanda.
- Mantenimiento: Realizar inspecciones periódicas para limpiar los colectores y revisar el estado del sistema de tuberías y el tanque de almacenamiento. Asegurar que las válvulas y conexiones estén en buen estado para evitar fugas y pérdidas de eficiencia.

Beneficios Ambientales y Económicos:

- Ahorro Energético: El uso de colectores solares térmicos puede reducir significativamente el consumo de electricidad o gas utilizado para calentar agua, disminuyendo los costos operativos de la vivienda.

- Reducción de Emisiones: El calentamiento solar de agua no produce emisiones de CO2, contribuyendo a la mitigación del cambio climático.
- Durabilidad y Bajo Mantenimiento: Los sistemas de calentamiento solar de agua son duraderos y requieren un mantenimiento mínimo, lo que los hace una inversión a largo plazo eficiente y rentable.

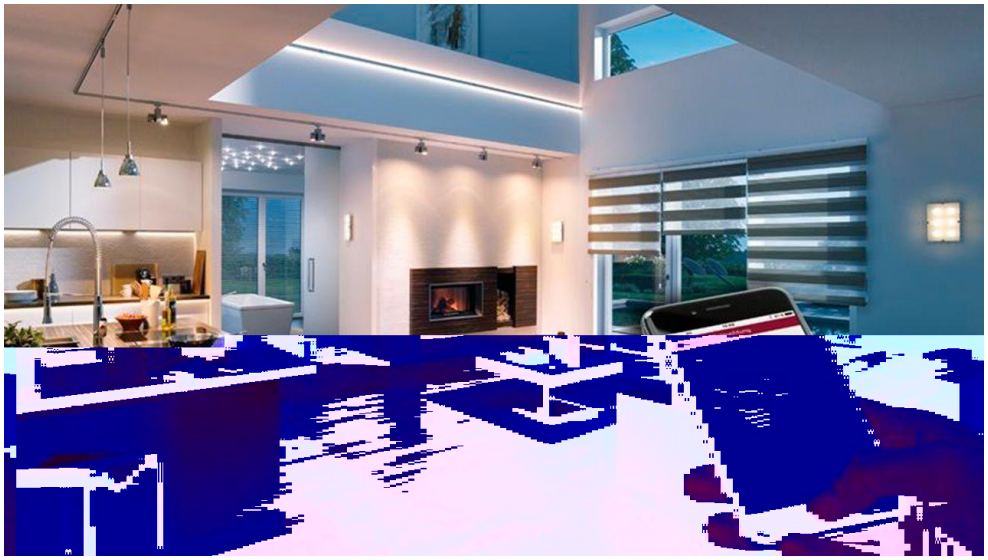
4.4.3 Recomendaciones constructivas para el uso de tecnologías de eficiencia energética

La eficiencia energética es un componente clave de la construcción sostenible. Implementar tecnologías y prácticas que reduzcan el consumo de energía no solo disminuye las emisiones de CO2, sino que también genera ahorros económicos a largo plazo. A continuación, se presentan recomendaciones específicas para mejorar la eficiencia energética en una vivienda unifamiliar de dos pisos en Colombia.

Iluminación y Aparatos Eficientes

Figura 12

Iluminación LED de viviendas



Fuente: iluminación led vivienda - Búsqueda Imágenes (bing.com)

Iluminación LED:

- Selección de Bombillas: Utilizar bombillas LED en todas las áreas de la vivienda, desde espacios comunes hasta habitaciones individuales. Las bombillas LED son más eficientes que las incandescentes y fluorescentes, y tienen una vida útil más larga.
- Distribución de la Iluminación: Planificar una distribución estratégica de las luces para maximizar la iluminación y minimizar la cantidad de bombillas necesarias. Incluir sensores de movimiento y reguladores de intensidad para áreas donde la luz artificial no se necesita constantemente.

- Integración de Luz Natural: Complementar la iluminación LED con la maximización de la luz natural mediante ventanas bien ubicadas, tragaluces y claraboyas.

Electrodomésticos de Bajo Consumo:

- Certificación de Eficiencia Energética: Seleccionar electrodomésticos que cuenten con certificación de eficiencia energética, como los de clase A+ o superior. Estos dispositivos consumen menos energía y, a menudo, tienen funciones avanzadas que optimizan su uso.
- Optimización del Uso de Electrodomésticos: Instruir a los residentes sobre el uso eficiente de los electrodomésticos, como lavar ropa con cargas completas, desconectar aparatos cuando no estén en uso y utilizar programas de bajo consumo en lavadoras y lavavajillas.

Diseño Bioclimático

Figura 13

Diseño bioclimático de viviendas



Fuente: diseño bioclimatico vivienda - Búsqueda Imágenes (bing.com)

Orientación y Ventilación Natural:

- Orientación del Edificio: Diseñar la vivienda con una orientación que maximice la captación de luz solar durante el día. En Colombia, esto generalmente implica orientar las ventanas principales hacia el norte para aprovechar la luz natural sin sobrecalentar los espacios.
- Ventilación Cruzada: Implementar un diseño que favorezca la ventilación cruzada natural, permitiendo que el aire fluya libremente a través de la vivienda. Esto reduce la necesidad de sistemas de climatización mecánica.
- Materiales y Elementos de Sombra: Utilizar aleros, persianas y vegetación para proporcionar sombra durante las horas de mayor radiación solar, ayudando a mantener los espacios interiores frescos.

Aislamiento y Materiales de Construcción:

- Aislamiento Eficiente: Incorporar materiales aislantes en las paredes, techos y pisos para reducir la transferencia de calor. Materiales como la fibra de coco y el lino son opciones sostenibles y eficientes.

- Ventanas y Puertas de Alta Eficiencia: Instalar ventanas y puertas con doble acristalamiento y marcos bien sellados para minimizar las pérdidas de calor y mantener una temperatura interior confortable.

4.4.4 Recomendaciones constructivas para el uso tecnologías de agua sostenible

El manejo eficiente del agua es un aspecto crucial de la construcción sostenible, especialmente en regiones donde el acceso a recursos hídricos es limitado. La implementación de tecnologías de agua sostenible en una vivienda unifamiliar de dos pisos puede significar una reducción significativa en el consumo de agua y una mejor gestión de los recursos hídricos disponibles. A continuación, se presentan recomendaciones específicas para optimizar el uso del agua en una vivienda en Colombia.

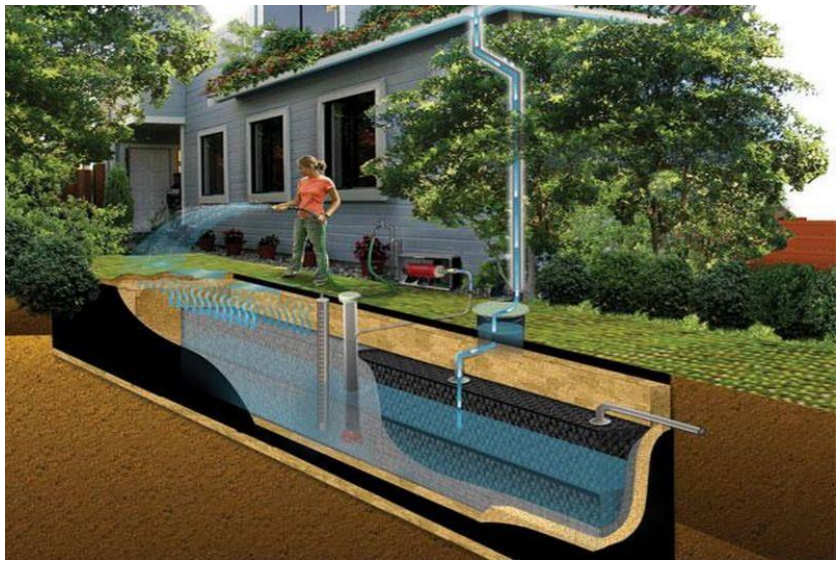
Recolección y Reutilización de Agua

Sistemas de Captación de Agua de Lluvia:

- Instalación de Sistemas de Captación: Colocar sistemas de captación de agua de lluvia en los techos, que incluyen canaletas, filtros y tanques de almacenamiento. Esta agua puede ser utilizada para riego, lavado de autos, y en las cisternas de los inodoros.

Figura 14

Sistema de captación de agua lluvia



Fuente: Recolección y Reutilización de Agua - Búsqueda Imágenes (bing.com)

- Dimensionamiento Adecuado: Asegurar que los tanques de almacenamiento tengan la capacidad adecuada para captar suficiente agua de lluvia según las precipitaciones locales y el tamaño del techo.
- Mantenimiento Regular: Implementar un plan de mantenimiento para limpiar las canaletas y filtros, y revisar periódicamente los tanques para prevenir obstrucciones y asegurar la calidad del agua recolectada.

Tratamiento de Aguas Grises:

- Sistema de Tratamiento: Instalar sistemas de tratamiento de aguas grises que recojan el agua utilizada en lavabos, duchas y lavadoras. Este sistema debe incluir filtración y desinfección para garantizar que el agua tratada sea segura para su reutilización.

- Reutilización: Utilizar el agua tratada para el riego de jardines y en los inodoros. Esta práctica puede reducir significativamente el consumo de agua potable.
- Educación y Uso Correcto: Capacitar a los residentes sobre el uso adecuado del sistema de aguas grises para asegurar su efectividad y longevidad.

Dispositivos de Ahorro de Agua

Figura 15 *Reutilización y aprovechamiento de aguas grises*



Fuente: Recolección y Reutilización de Agua - Búsqueda Imágenes (bing.com)

Grifos y Duchas de Bajo Flujo:

- Instalación de Aeradores: Equipar todos los grifos y duchas de la vivienda con aeradores de bajo flujo, que mezclan aire con el agua para mantener la presión del agua mientras reducen el consumo.
- Selección de Equipos Eficientes: Elegir modelos de grifos y duchas que estén certificados por su eficiencia en el uso del agua. Estos dispositivos pueden reducir el consumo de agua sin comprometer la experiencia del usuario.
- Monitoreo y Mantenimiento: Realizar revisiones periódicas de los dispositivos para asegurar que estén funcionando correctamente y reemplazar los que presenten fugas o desgaste.

4.4.5 Recomendaciones constructivas para el uso de construcción prefabricada

La construcción prefabricada representa una estrategia eficiente y sostenible que puede transformar la manera en que se desarrollan las viviendas, especialmente en el contexto de países en desarrollo como Colombia. Este método de construcción no solo acelera el proceso de edificación, sino que también minimiza el desperdicio de materiales y mejora la calidad del producto final. A continuación, se presentan recomendaciones específicas para el uso de tecnologías de construcción prefabricada en una vivienda unifamiliar de dos pisos.

Elementos Prefabricados

Figura 16

Sistema constructivo de prefabricados



Fuente: elementos prefabricados - Búsqueda Imágenes (bing.com)

Módulos Estructurales Prefabricados:

- Selección de Materiales: Elegir materiales locales y sostenibles para la fabricación de módulos estructurales prefabricados. En Colombia, materiales como el bambú y la guadua pueden ser utilizados debido a sus propiedades de resistencia y flexibilidad.
- Fabricación en Planta: Producir módulos estructurales en una planta de fabricación controlada para asegurar precisión y calidad. Esto permite un mayor control sobre el uso de materiales y reduce el desperdicio.
- Transporte y Montaje: Planificar el transporte eficiente de los módulos desde la planta hasta el sitio de construcción. Diseñar los módulos para que sean fáciles de ensamblar en el sitio, minimizando el tiempo y los costos de construcción.

- Integración de Servicios: Incorporar los servicios eléctricos, hidráulicos y de comunicaciones en los módulos prefabricados para simplificar y acelerar el proceso de instalación en el sitio.

Paneles Aislantes Prefabricados:

- Tipos de Paneles: Utilizar paneles aislantes prefabricados como paneles SIP (Structural Insulated Panels) que combinan aislamiento térmico con estructura portante. Estos paneles pueden ser fabricados con materiales como poliuretano, poliestireno expandido (EPS), o lana mineral.
- Eficiencia Energética: Implementar paneles con alta eficiencia energética para mejorar la performance térmica de la vivienda, reduciendo la necesidad de sistemas de climatización y, por ende, el consumo energético.
- Rápida Instalación: Diseñar los paneles para una fácil y rápida instalación en el sitio. Esto no solo acelera el tiempo de construcción, sino que también reduce los costos laborales y el impacto ambiental asociado con la construcción tradicional.
- Acabados Integrados: Incluir acabados exteriores e interiores en los paneles prefabricados para reducir aún más el tiempo y los costos de construcción en el sitio.

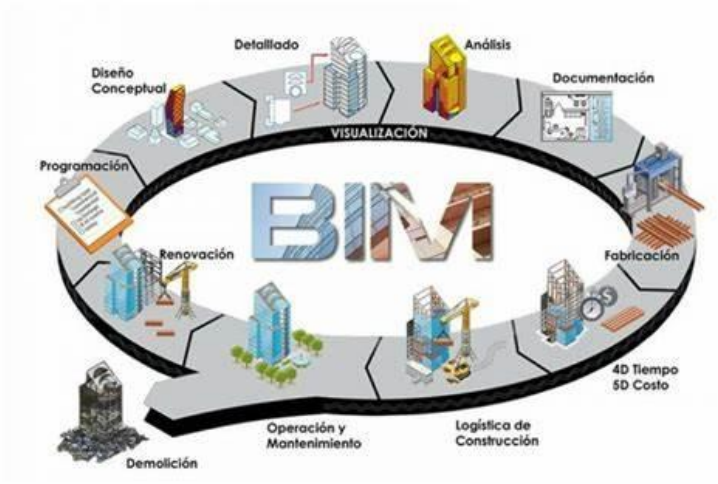
4.4.6 Recomendaciones constructivas para el uso de tecnologías digitales y de información

La integración de tecnologías digitales y de información en la construcción sostenible es esencial para optimizar los procesos de diseño, planificación, y operación de las viviendas. Estas

tecnologías permiten una mayor eficiencia en el uso de recursos, mejoran la calidad de la construcción, y facilitan la implementación de soluciones sostenibles. A continuación, se presentan recomendaciones específicas para el uso de estas tecnologías en una vivienda unifamiliar de dos pisos en Colombia.

Modelado de Información de Construcción (BIM)

Figura 17 *Conceptualización BIM*



Fuente: [Modelado de Información de Construcción (BIM) - Búsqueda Imágenes (bing.com)]

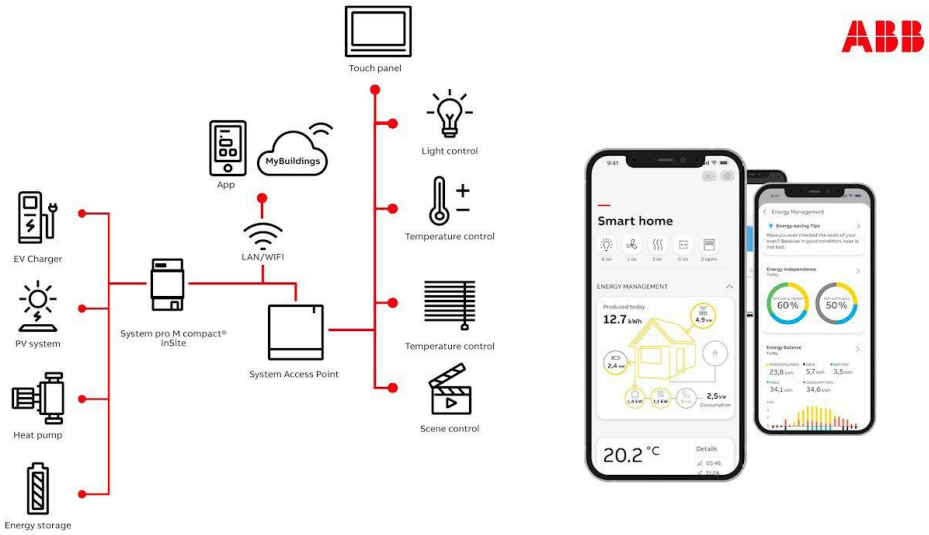
Planificación y Diseño BIM:

- Integración de Tecnologías Sostenibles: Utilizar herramientas de Modelado de Información de Construcción (BIM) desde las etapas iniciales del diseño para integrar tecnologías sostenibles como energías renovables, sistemas de eficiencia energética y materiales ecológicos. BIM permite visualizar y analizar el impacto de estas tecnologías en el proyecto.

- Optimización de Recursos: Emplear BIM para la planificación detallada de recursos, minimizando el desperdicio de materiales y optimizando el uso de recursos. BIM facilita la coordinación entre diferentes disciplinas (arquitectura, ingeniería, construcción), mejorando la eficiencia y reduciendo errores.
- Simulación de Ciclo de Vida: Realizar simulaciones del ciclo de vida del edificio utilizando BIM para evaluar el desempeño energético y las emisiones de CO2 a lo largo del tiempo. Esto ayuda a tomar decisiones informadas sobre la selección de materiales y tecnologías, asegurando la sostenibilidad del proyecto.

Monitorización y Gestión Inteligente

Figura 18 *Monitoreo y gestión inteligente de viviendas*



Fuente: [Monitorización y Gestión Inteligente - Búsqueda Imágenes (bing.com)]

Sistemas Domóticos:

- Control del Consumo Energético: Implementar sistemas domóticos que permitan la monitorización y gestión inteligente del consumo de energía en la vivienda. Estos sistemas pueden incluir sensores y dispositivos conectados que optimicen el uso de la iluminación, la calefacción, la refrigeración y los electrodomésticos, reduciendo el consumo energético y las emisiones de CO2.
- Gestión del Agua: Utilizar sistemas domóticos para controlar y gestionar el consumo de agua, incluyendo la monitorización de sistemas de recolección de agua de lluvia y el uso eficiente del agua en grifos y duchas de bajo flujo. La gestión inteligente del agua ayuda a conservar este recurso vital y reduce el desperdicio.
- Automatización y Confort: Incorporar dispositivos de automatización para mejorar el confort y la eficiencia de la vivienda. Por ejemplo, termostatos inteligentes, sistemas de iluminación automatizada y controles de seguridad que se pueden gestionar remotamente a través de aplicaciones móviles.

5. Conclusiones

La investigación desarrollada profundiza en los avances y desafíos dentro de la construcción sostenible, como lo evidencia la revisión sistemática de la literatura desde 2013 hasta 2023. El impacto ambiental de la industria de la construcción ha impulsado la búsqueda de prácticas sostenibles en todo su espectro. La revisión, realizada a través de la base de datos Scopus, siguió meticulosamente criterios predefinidos, lo que resultó en la identificación de 531 documentos pertinentes. A través de un análisis completo en tres fases - cuantitativa, meta-análisis y cualitativa, se rastreó la evolución de los estudios en diversas áreas.

La construcción sostenible es un enfoque integral que busca minimizar el impacto ambiental, promover la eficiencia en el uso de recursos y fomentar la responsabilidad social y económica a lo largo del ciclo de vida de las edificaciones. Este concepto, también conocido como construcción verde o construcción ecológica, se fundamenta en principios que van desde la eficiencia energética hasta la gestión de residuos, con el propósito de alcanzar un desarrollo equilibrado y responsable.

En este contexto, las tecnologías limpias desempeñan un papel fundamental. La eficiencia energética, mediante la adopción de tecnologías como iluminación LED y sistemas de climatización eficientes, reduce el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero. La integración de energías renovables, como paneles solares y turbinas eólicas, promueve la generación de electricidad limpia y la autosuficiencia energética. Asimismo, la selección de materiales sostenibles, la gestión del agua y el diseño bioclimático contribuyen a minimizar el impacto ambiental y mejorar la calidad de vida de los ocupantes.

Además, las tecnologías emergentes están transformando la industria de la construcción. La prefabricación reduce el desperdicio de materiales y acelera los plazos de construcción, mientras que los sistemas BIM mejoran la coordinación entre equipos y reducen los errores durante la construcción. La integración de sensores y sistemas inteligentes optimiza el rendimiento operativo de los edificios, y la impresión 3D ofrece nuevas posibilidades en términos de eficiencia y personalización.

La implementación de tecnologías y prácticas sostenibles en la construcción de viviendas en Colombia demuestra un gran potencial para reducir el impacto ambiental y fomentar un desarrollo urbano más sostenible. La guía presentada destaca cómo el uso de materiales locales y reciclados, junto con la integración de energías renovables, tecnologías de eficiencia energética, tecnologías de agua sostenible, construcción prefabricada y tecnologías digitales, contribuye a una edificación más responsable y eficiente.

En conjunto, estas soluciones permiten optimizar el uso de recursos naturales, minimizar las emisiones de CO2 y mejorar la eficiencia energética de las viviendas. La adopción de estas prácticas no solo responde a las necesidades actuales de sostenibilidad, sino que también prepara el camino para un entorno construido más resiliente y adaptable a futuros desafíos climáticos.

Finalmente, a pesar de los avances, persisten desafíos en la construcción de viviendas sostenibles, especialmente en áreas como la generación de energía renovable, la eficiencia energética y la gestión de residuos. Sin embargo, estas dificultades también representan

oportunidades para la innovación y el desarrollo de soluciones más efectivas y sostenibles. La construcción sostenible no solo busca minimizar los impactos negativos, sino también generar beneficios tangibles en términos de eficiencia, resiliencia y calidad de vida para las comunidades. Es un enfoque que busca armonizar las necesidades presentes con las futuras, promoviendo un desarrollo que respete los límites del planeta y garantice un futuro habitable para las generaciones venideras.

Referencias

Abuzeinab, A., Oltean-Dumbrava, C., & Dickens, D. (2016). Understanding sustainability through bradford affordable housing lens. *International Journal for Housing Science and Its Applications*, *40*(4), 291–303. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85009424223&partnerID=40&md5=847b4388f17c5d9d66f1ca5c7d998e4b

Adekunle, T. O., & Nikolopoulou, M. (2020). Post-occupancy evaluation on people's perception of comfort, adaptation and seasonal performance of sustainable housing: a case study of three prefabricated structural timber housing developments. *Intelligent Buildings International*, *12*(2), 71–99. https://doi.org/10.1080/17508975.2018.1493677

Affolderbach, J., Schulz, C., & Braun, B. (2018). Green building as urban climate change strategy. *Urban Book Series*, *9783319777085*, 3–14. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77709-2_1

Akadiri, P. O., Olomolaiye, P. O., & Chinyio, E. A. (2013). Multi-criteria evaluation model for the selection of sustainable materials for building projects. *Automation in Construction*, *30*, 113–125. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.10.004

Akinwumi, I. I. (2014). Earth building construction processes in Benin city, Nigeria and engineering classification of earth materials used. *Indian Journal of Traditional Knowledge*, *13*(4), 686–690. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84908116867&partnerID=40&md5=547bf433f371fe2c674477b3a579d4a7

Ali, H. H., & Alzu'bi, S. N. (2017). Design optimization of sustainable affordable housing model in hot-arid climate-case of Jordan. *International Journal of Housing Markets and Analysis*, *10*(5), 607–627. https://doi.org/10.1108/IJHMA-01-2017-0009

Al-Saffar, S. F., & Younis, G. M. (2023). Strategies of Water Management in Outdoor Space of Sustainable Housing-Water Material Heritage of Historic City of Nineveh. In M. Casini (Ed.), *Lecture Notes in Civil Engineering: Vol. 279 LNCE* (pp. 470–490). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-981-19-4293-8_49

Anbari Moghadam, M., Bagherpour, M., & Ghannadpour, S. F. (2024). Sustainability assessment in construction projects: a sustainable earned value management model under uncertain and unreliable conditions. *Environment Systems and Decisions*, *44*(1), 45–68. https://doi.org/10.1007/s10669-023-09913-2

Average, C. (2019). Low income housing problems and low-income housing solutions: opportunities and challenges in Bulawayo. *Journal of Housing and the Built Environment*, *34*(3), 927–938. https://doi.org/10.1007/s10901-019-09676-w

Betancourt, J., Salcedo, D., Díaz, W., Betancourt, A., Betancourt, J., Salcedo, D., Diaz, W., & Betancourt, A. (2021). Desarrollo sostenible: desafíos medioambientales frente a los retos de la cuarta revolución industrial Sustainable development: environmental challenges facing the issues of the fourth industrial revolution. “Desarrollo sostenible: desafíos medioambientales frente a los retos de la cuarta revolución industrial.” *Prospectiva*, *19*(1). https://doi.org/10.15665/rp.v19i1.2494

Calderon, F. (2019). Incorporation of Materials that Improve Durability, Resistance to Water and Anti-seismic Behaviour for Sustainability Earthen Construction Techniques Used in Rural Housing in Ráquira, Colombia. In *World Sustainability Series* (pp. 425–438). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03562-4_22

Carmona, S., Pareti, S., Rudolph, L., & Flores, D. (2023). Bioclimatic Architecture as a Design Basis for the Use of Renewable Energies and Sustainable Development, the Case of

Sustainable Social Housing in Patagonia, Aysén, Chile. *Environmental Science and Engineering*, 158 – 163. https://doi.org/10.1007/978-981-99-1381-7_15

Cascone, S., Gagliano, A., Nocera, F., Rapisarda, R., & Sciuto, G. (2021a). Sustainable Housing Units for Emergency: Innovative Materials and Construction Techniques. In J. Littlewood, R. J. Howlett, R. J. Howlett, R. J. Howlett, L. C. Jain, L. C. Jain, & L. C. Jain (Eds.), *Smart Innovation, Systems and Technologies* (Vol. 203, pp. 407–417). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8783-2_34

Cascone, S., Gagliano, A., Nocera, F., Rapisarda, R., & Sciuto, G. (2021b). Sustainable Housing Units for Emergency: Innovative Materials and Construction Techniques. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, *203*, 407 – 417. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8783-2_34

Ceja Soto, F. R., Pérez Bueno, J. J., Mendoza López, M. L., Pérez Ramos, M. E., Reyes Araiza, J. L., Ramírez Jiménez, R., & Manzano-Ramírez, A. (2020). Evaluating the thermal behavior of a sustainable room and roof prototype using recycled waste materials. *Recycling*, *5*(1). https://doi.org/10.3390/recycling5010002

Channuntapipat, C. (2021). Assurance services for sustainability reporting and beyond. In *Routledge Handbook of Environmental Accounting* (pp. 125–136). Taylor and Francis. https://doi.org/10.4324/9780367152369-11

Chau, C. K., Hui, W. K., Ng, W. Y., Leung, T. M., & Xu, J. M. (2017). Assessment of CO2 Emissions Reduction in High-Rise Concrete Office Buildings Using Different Material-Use Options. In *Handbook of Low Carbon Concrete*. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804524-4.00003-8

Chen, C.-J., Chen, S.-Y., Li, S.-H., & Chiu, H.-T. (2017). Green BIM-based building energy performance analysis. *Computer-Aided Design and Applications*, *14*(5), 650–660. https://doi.org/10.1080/16864360.2016.1273582

Coma Bassas, E., Patterson, J., & Jones, P. (2020). A review of the evolution of green residential architecture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *125*. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109796

Congreso de Colombia. (1973). Ley 23 de 1973. Por la cual se conceden facultades extraordinarias al Presidente de la República para expedir un Código de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Diario Oficial No. 34.459, 20 de diciembre de 1973.

Congreso de Colombia. (1979). Ley 9 de 1979. Por la cual se dictan medidas sanitarias. Diario Oficial No. 35.230, 28 de enero de 1979.

Congreso de Colombia. (1993). Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. 41.148, 22 de diciembre de 1993.

Congreso de Colombia. (1994). Ley 143 de 1994. Por la cual se establecen disposiciones para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica. Diario Oficial No. 41.321, 19 de enero de 1994.

Congreso de Colombia. (1997). Ley 373 de 1997. Por la cual se establece el Programa para el Uso Racional y Ahorro del Agua. Diario Oficial No. 43.050, 7 de febrero de 1997.

Congreso de Colombia. (1997). Ley 388 de 1997. Por la cual se modifica la Ley 9 de 1989, y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. 43.127, 18 de julio de 1997.

Congreso de Colombia. (2001). Ley 697 de 2001. Por la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía y se promueven fuentes no convencionales de energía. Diario Oficial No. 44.387, 27 de diciembre de 2001.

Congreso de Colombia. (2008). Ley 1259 de 2008. Por la cual se instaura el comparendo ambiental y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. 47.034, 5 de diciembre de 2008.

Cudzik, J., & Atasoy, A. (2023). THE IMPACT OF CONTEMPORARY TECHNOLOGY ON SHELL STRUCTURES: MATERIAL AND LIGHT SOLUTIONS. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, *64*(1), 34 – 45. https://doi.org/10.20898/j.iass.2022.022

Culwick Fatti, C. (2022). Towards just sustainability through government-led housing: conceptual and practical considerations. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, *54*. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101150

D'Alessandro, A., Fabiani, C., Pisello, A. L., Ubertini, F., Luigi Materazzi, A., & Cotana, F. (2017). Innovative concretes for low-carbon constructions: A review. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, *12*(3), 289–309. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85031758015&partnerID=40&md5=f683c73ef548afe0da22a8a6e02a67bd

De Araujo, V. A., Colauto, L. R., Abel, L. G. C., do Rosário, F. S., Vasconcelos, J. S., Morales, E. A. M., Barbosa, J. C., Gava, M., & Christoforo, A. L. (2023). Bamboo Construction: Main Building Techniques and Their Resources, Sustainability, History, Uses, and Classification. In *Environmental Footprints and Eco-Design of Products and Processes* (pp. 25–60). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-0232-3_2

Deng, Y., Gan, V. J. L., Das, M., Cheng, J. C. P., & Anumba, C. (2019). Integrating 4D BIM and GIS for Construction Supply Chain Management. *Journal of Construction Engineering and Management*, *145*(4). https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001633

Departamento Nacional de Planeación de Colombia. (2005). Documento Conpes 3343. Por el cual se aprueba el documento Conpes 3343, que establece lineamientos y estrategias para el desarrollo sostenible en los sectores de agua, ambiente y desarrollo territorial. Recuperado de [https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3343.pdf].

Departamento Nacional de Planeación de Colombia. (2014). Documento Conpes 3819. Por el cual se aprueba la política nacional para consolidar el sistema de ciudades en Colombia, buscando construir "Ciudades Sostenibles y Competitivas". Recuperado de [https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/conpes-3819-de-2014/].

Dhumad, K. F. (2023). Qualifying Current Housing Standards in Iraq for Sustainability. *International Review of Civil Engineering*, *14*(3), 208–218. https://doi.org/10.15866/irece.v14i3.22704

Ding, G. K. C. (2013). Strategies for sustainable housing development-the challenges from renewable energy. *International Journal for Housing Science and Its Applications*, *37*(4), 239–248. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84888367982&partnerID=40&md5=c0165b880584fb5e225aed1d888ee7cc

Dolenc, M., & Klinc, R. (2017). Open BIM enabled energy-efficient building design and simulation. *Civil-Comp Proceedings*, *111*. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85020473916&partnerID=40&md5=a3fb7eb9a0507ab547a20007b0d7b98a

Elbreki, A. M., Alghoul, M. A., Al-Shamani, A. N., Ammar, A. A., Yegani, B., Aboghrara, A. M., Rusaln, M. H., & Sopian, K. (2016). The role of climatic-design-operational parameters on combined PV/T collector performance: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *57*, 602–647. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.077

Enshassi, A., Al Ghoul, H., & AlKilani, S. (2018). Exploring sustainable factors during construction projects' life cycle phases; [Exploración de los factores de desarrollo sostenible durante las fases del ciclo de vida de los proyectos de construcción]. *Revista Ingenieria de Construccion*, *33*(1), 51 – 68. https://doi.org/10.4067/s0718-50732018000100051

Evain, C., & Imoniana, J. O. (2019). Assurance of sustainability environmental contingencies – Experience from France. *International Journal of Global Warming*, *17*(3), 315–345. https://doi.org/10.1504/IJGW.2019.098528

Flores, Á. R. S., & Merma Gallardo, L. M. (2022). Sustainable housing for the high Andean areas of Peru, applying architectural, environmental and construction criteria; [Vivienda sostenible para las zonas alto andinas del Perú, aplicando criterios arquitectónicos, ambientales y constructivos]. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*, *2022-July*. https://doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.42

Fosterharoldas Swasto, D. (2018). Friendly vertical housing: Case of walk-up flat housing development in Yogyakarta. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *126*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/126/1/012178

Friedman, A. (2023). Fundamentals of Innovative Sustainable Homes Design and Construction. *Urban Book Series, Part F740*, 1 – 398. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85165884056&partnerID=40&md5=8bbe7823ac8afd76f81a29a5e3c9fcbd

Galford, G., & Tucker, L. M. (2021). Resilient Experiments in Rural Housing: Architectural Experiments in Planned Housing. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *903*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/903/1/012001

Gangolells, M., Casals, M., Gassó, S., Forcada, N., Roca, X., & Fuertes, A. (2009). A methodology for predicting the severity of environmental impacts related to the construction process of residential buildings. *Building and Environment*, *44*(3), 558–571. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.05.001

García-Ruiz, A., Díez-Minguito, M., Verichev, K., & Carpio, M. (2024). Bibliometric Analysis of Urban Coastal Development: Strategies for Climate-Resilient Timber Housing. *Sustainability (Switzerland)*, *16*(4). https://doi.org/10.3390/su16041431

Garzón, E., & Sánchez-Soto, P. J. (2013). Planning collection and flow of solid waste (construction and demolition, concrete, ceramic and others) using a computerized tool for sustainable management; [Planificación de recogida y flujo de residuos sólidos (de construcción y demolición, hormigón, cerámica y otros) mediante la utilización de una herramienta informatizada para su gestión sostenible]. *Boletin de La Sociedad Espanola de Ceramica y Vidrio*, *52*(5), V–XIV. https://doi.org/10.3989/cyv.2013.v52.i5.1231

Gobierno de Colombia. (2012). Agenda 21. Recuperado de [https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf].

Gobierno de Colombia. (2013). Código de Construcción Sostenible. Recuperado de [https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/construccion-sostenible/].

Grealy, L., Lea, T., Moskos, M., Benedict, R., Habibis, D., & King, S. (2022). Sustaining housing through planned maintenance in remote Central Australia. *Housing Studies*. https://doi.org/10.1080/02673037.2022.2084045

Gu, Y. (2021). The application of BIM technology in construction project management. *ACM International Conference Proceeding Series*. https://doi.org/10.1145/3465631.3465821

Hamada, H. M., Shi, J., Al Jawahery, M. S., Majdi, A., Yousif, S. T., & Kaplan, G. (2023). Application of natural fibres in cement concrete: A critical review. *Materials Today Communications*, *35*, 105833. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105833

Iddio, E., Wang, L., Thomas, Y., McMorrow, G., & Denzer, A. (2020). Energy efficient operation and modeling for greenhouses: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *117*. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109480

Iulo, L. D., & Lowe, S. K. (2023). GreenBuild and Energy+: Integrative Design of Affordable Sustainable Housing in Education. In *World Sustainability Series* (pp. 361–389). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22856-8_21

Jiménez-Expósito, R. A., Serrano-Jiménez, A., Fernández-Ans, P., Stasi, G., Díaz-López, C., & Barrios-Padura, Á. (2023). Promoting Sustainable and Resilient Constructive Patterns in Vulnerable Communities: Habitat for Humanity's Sustainable Housing Prototypes in El Salvador. *Sustainability (Switzerland)*, *15*(1). https://doi.org/10.3390/su15010352

Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A., & Kim, K.-H. (2018). Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *82*, 894–900. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094

Khatibi, M. (2019). Passive house-concept apartments: Sustainability evaluation in a case study of Stockholm, Sweden. In A. Passer, T. Lutzkendorf, G. Habert, H. Kromp-Kolb, & M. Monsberger (Eds.), *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 323, Issue 1). Institute of Physics Publishing. https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012032

Kim, K. P. (2019). BIM-Enabled Sustainable Housing Refurbishment—LCA Case Study. In *Sustainable Construction Technologies: Life-Cycle Assessment* (pp. 349–394). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811749-1.00019-5

Lee, K. S., Lee, J., & Lee, J. S. (2013). Low-energy design methods and its implementation in architectural practice: Strategies for energy-efficient housing of various densities in temperate climates. *Journal of Green Building*, *8*(4), 164–183. https://doi.org/10.3992/jgb.8.4.164

Leiva, C. B., Soto, P. G., Pulgar, E. P., Cascante, D. V, & Nova, C. U. (2021). Structural system based on wooden preassembled panels for sustainable social housing. *World Conference on Timber Engineering 2021, WCTE 2021*. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85120724549&partnerID=40&md5=7c322f7f17a3336f7e416e3bdae79709

Lima, L., Trindade, E., Alencar, L., Alencar, M., & Silva, L. (2021). Sustainability in the construction industry: A systematic review of the literature. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 289). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125730

Liu, K., Liu, Y., & Kou, Y. (2024). Study on construction safety management in megaprojects from the perspective of resilient governance. *Safety Science*, *173*. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106442

Lorek, S., & Spangenberg, J. H. (2019). Energy sufficiency through social innovation in housing. *Energy Policy*, *126*, 287 – 294. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.11.026

Luhar, S., Luhar, I., Abdullah, M. M. A. B., & Hussin, K. (2021). Challenges and prospective trends of various industrial and solid wastes incorporated with sustainable green concrete. In *Advances in Organic Farming: Agronomic Soil Management Practices*. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822358-1.00001-8

Maldonado-Pinto, J. E. (2022). Construction of a sustainable ecotourism model for the North of Santander; [Construcción de un modelo de ecoturismo sostenible para el Norte de Santander]. *Aibi, Revista de Investigacion Administracion e Ingenierias*, *10*(2), 1 – 8. https://doi.org/10.15649/2346030X.2479

Mangold, M. (2019). The “sustainable house” in peri-urban areas in Alsace: Between heritage and the renewal of “pavilion” housing; [La « maison durable» dans les espaces périurbains en Alsace: Entre héritage et renouvellement de l’habitat « pavillonnaire»]. *Espace-Populations-Societes*, *20193*. https://doi.org/10.4000/EPS.9415

Martínez-Rocamora, A., Solís-Guzmán, J., & Marrero, M. (2017). Carbon footprint of utility consumption and cleaning tasks in buildings. In *Environmental Carbon Footprints: Industrial Case Studies*. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812849-7.00009-X

Mavi, R. K., Gengatharen, D., Mavi, N. K., Hughes, R., Campbell, A., & Yates, R. (2021). Sustainability in construction projects: A systematic literature review. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 4, pp. 1–24). MDPI. https://doi.org/10.3390/su13041932

Mealla, L. E., Naranjo, J. A., Pacheco, J. P., Redondo, J. D., & Zuluaga, D. P. (2015). Eficiencia de diferentes modelos de cocinas solares evaluadas bajo condiciones ambientales de la costa caribe colombiana. *Prospectiva, 13*(2), 72. https://doi.org/10.15665/rp.v13i2.489

Mendonça, P., & Bragança, L. (2007). Sustainable housing with mixedweight strategy-A case study. *Building and Environment*, *42*(9), 3432 – 3443. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.08.025

Miller, W., & Buys, L. (2013). Factors influencing sustainability outcomes of housing in subtropical Australia. *Smart and Sustainable Built Environment*, *2*(1), 60–83. https://doi.org/10.1108/20466091311325854

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. (2012). Criterios Ambientales para el Diseño y Construcción de Vivienda Urbana. Recuperado de [https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Cartilla_Criterios_Ambientales_Diseno_y_Construccion_de_Vivienda_Urbana.pdf].

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. (2015). Resolución 0549 de 2015. Por la cual se reglamenta el capítulo 1 del título 7 de la parte 2, del libro 2 del Decreto 1077 de 2015, en cuanto a los parámetros y lineamientos de construcción sostenible y se adopta la Guía para el ahorro de agua y energía en edificaciones. Diario Oficial No. 49.595, 24 de marzo de 2015.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. (2017). Resolución 472 de 2017. Por la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición, estableciendo pautas para su adecuado manejo y disposición. Diario Oficial No. 50.195, 27 de febrero de 2017.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia. (2008). Política de Gestión Ambiental Urbana. Recuperado de [https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/politica-de-gestion-ambiental-urbana/].

Ministerio de Desarrollo Económico de Colombia. (1994). Resolución 541 de 1994. Por la cual se reglamenta el cargue, descargue, transporte, almacenamiento y disposición final de escombros y materiales de construcción. Diario Oficial No. 41.391, 1 de marzo de 1994.

Ministerio de Salud de Colombia. (1983). Resolución 8321 de 1983. Por la cual se establecen normas de protección y conservación de la audición. Diario Oficial No. 37.692, 25 de agosto de 1983.

Moore, T., & Doyon, A. (2023). A Transition to Sustainable Housing: Progress and Prospects for a Low Carbon Housing Future. In *A Transition to Sustainable Housing: Progress and Prospects for a Low Carbon Housing Future*. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2760-9

Nadal, A., Rodríguez-Labajos, B., Cuerva, E., Josa, A., & Rieradevall, J. (2022). Influence of social housing models in the development of urban agriculture in Mexico. *Land Use Policy*, *122*. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106391

Nagarjuna, G., Arjun, B. S., Shabarisha, N., & Gowri Shankar, R. (2022). Prefabricated Houses - A Model to Sustainable Housing Market. *ECS Transactions*, *107*(1), 3781–3792. https://doi.org/10.1149/10701.3781ecst

Nakamura, M. (2018). Sustainable houses in Japan: An overview. In *Sustainable Houses and Living in the Hot-Humid Climates of Asia* (pp. 491–501). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8465-2_46

Nebrida, J. A., & Gomba, F. E. (2023). Sustainable construction strategies for building construction projects in the Kingdom of Bahrain: a model. *Sustainable Engineering and Innovation*, *5*(1), 31 – 45. https://doi.org/10.37868/sei.v5i1.id198

Oke, A. E., Aliu, J., & Onajite, S. A. (2023). Barriers to the adoption of digital technologies for sustainable construction in a developing economy. *Architectural Engineering and Design Management*. https://doi.org/10.1080/17452007.2023.2187754

Oyinlola, M., & Whitehead, T. (2020). Recycling of Plastics for Low Cost Construction. In *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials: Volume 1-5* (Vols. 1–5, pp. 555–560). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11523-1

Pagani, A., & Binder, C. R. (2019). Towards housing sustainability: A framework for the decision-making process of tenants. In A. Passer, T. Lutzkendorf, G. Habert, H. Kromp-Kolb, & M. Monsberger (Eds.), *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 323, Issue 1). Institute of Physics Publishing. https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012093

Pasqualino, J., Cabrera, C., & Vanegas Chamorro, M. (2015). Los impactos ambientales de la implementación de las energías eólica y solar en el Caribe Colombiano. *Prospectiva*, *13*(1), 68. https://doi.org/10.15665/rp.v13i1.361

Patnaikuni, I., Setunge, S., & Himabindu, M. (2013). Sustainable housing construction to reduce greenhouse gas emissions. *Applied Mechanics and Materials*, *438–439*, 1710–1714. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.438-439.1710

Presidencia de la República de Colombia. (1974). Decreto 2811 de 1974. Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. 34.883, 18 de diciembre de 1974.

Presidencia de la República de Colombia. (1995). Decreto 948 de 1995. Por el cual se reglamentan disposiciones sobre la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. 41.531, 4 de mayo de 1995.

Presidencia de la República de Colombia. (1997). Decreto 3102 de 1997. Por el cual se reglamenta la instalación de equipos, sistemas e implementos de bajo consumo de agua. Diario Oficial No. 43.209, 23 de septiembre de 1997.

Presidencia de la República de Colombia. (1998). Decreto 1052 de 1998. Por el cual se reglamentan disposiciones referentes a licencias de construcción y urbanismo, así como sanciones urbanísticas. Diario Oficial No. 43.301, 6 de agosto de 1998.

Presidencia de la República de Colombia. (2002). Decreto 1713 de 2002. Por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994 y la Ley 632 de 2000, en relación con el servicio público domiciliario de aseo. Diario Oficial No. 44.905, 23 de agosto de 2002.

Presidencia de la República de Colombia. (2005). Decreto 838 de 2005. Por el cual se reglamenta la disposición final de residuos sólidos. Diario Oficial No. 46.013, 26 de abril de 2005.

Presidencia de la República de Colombia. (2007). Decreto 2501 de 2007. Por el cual se dictan disposiciones para promover prácticas de uso racional y eficiente de la energía eléctrica. Diario Oficial No. 46.752, 17 de julio de 2007.

Presidencia de la República de Colombia. (2009). Decreto 3695 de 2009. Por el cual se reglamenta la Ley 1259 de 2008 y se adoptan medidas para la imposición de comparendos ambientales. Diario Oficial No. 47.465, 3 de diciembre de 2009.

Presidencia de la República de Colombia. (2010). Decreto 1469 de 2010. Por el cual se reglamenta el artículo 57 de la Ley 388 de 1997, en lo relacionado con las licencias urbanísticas y la función pública de los curadores urbanos. Diario Oficial No. 47.776, 30 de julio de 2010.

Presidencia de la República de Colombia. (2015). Decreto 1285 de 2015. Por el cual se modifica el Decreto 1077 de 2015, en lo relacionado con los lineamientos de construcción sostenible para edificaciones. Diario Oficial No. 49.463, 26 de junio de 2015.

Qian, Y., Liu, H., Mao, P., & Zheng, X. (2023). Evaluation of Safety Management of Smart Construction Sites from the Perspective of Resilience. *Buildings*, *13*(9). https://doi.org/10.3390/buildings13092205

REGULATION (EU) No 305/2011 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL (2011).

Robinson, N. A. (1993). *Agenda 21: Earth's action plan*.

Rodríguez-Jiménez, C. E., Carretero-Ayuso, M. J., & Claro-Ponce, J. C. (2018). Influence of infiltrations in the energy retrofit of the envelope. A case study from the action plans in the public housing stock of Andalusia; [Influencia de las infiltraciones en la rehabilitación energética de la envolvente. El caso del plan de actuaciones en el parque público residencial de Andalucía]. *Informes de La Construccion*, *70*(551). https://doi.org/10.3989/ic.60450

Rostamnezhad, M., & Thaheem, M. J. (2022). Social Sustainability in Construction Projects—A Systematic Review of Assessment Indicators and Taxonomy. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 14, Issue 9). MDPI. https://doi.org/10.3390/su14095279

Roufechaei, K. M., Abu Bakar, A. H., & Tabassi, A. A. (2014). Energy-efficient design for sustainable housing development. *Journal of Cleaner Production*, *65*, 380–388. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.015

Satish, B. K., & Brennan, J. (2019). Understanding the energy use behaviour of British Indian households to shape optimised sustainable housing strategies in existing housing stock. *Sustainable Cities and Society*, *48*. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101542

Shi, Q., & Zhou, L. (2012). Next challenge of sustainable housing construction: Evidence from China. *International Journal for Housing Science and Its Applications*, *36*(4), 181 – 188. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84866433028&partnerID=40&md5=a9e1a1e85e533aa0ce805be0bfbc3751

Spagnoli, F. (2020). A new inclusive housing prototype. In D. B. G (Ed.), *Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 954, pp. 163–175). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20444-0_16

Srivastava, A., Singh, P., Janhavi, N. N., & Singh, A. (2017). Green buildings: Eco-friendly technique for modern cities. *Urban Book Series*, 415–432. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47145-7_26

Švajlenka, J., & Kozlovská, M. (2018). Houses based on wood as an ecological and sustainable housing alternative-Case study. *Sustainability (Switzerland)*, *10*(5). https://doi.org/10.3390/su10051502

Švajlenka, J., & Kozlovská, M. (2021). Factors influencing the sustainability of wood-based constructions' use from the perspective of users. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(23). https://doi.org/10.3390/su132312950

Tomovska, R., & Radivojević, A. (2017). Tracing sustainable design strategies in the example of the traditional Ohrid house. *Journal of Cleaner Production*, *147*, 10–24. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.073

Tumminia, G., Guarino, F., Longo, S., Ferraro, M., Cellura, M., & Antonucci, V. (2018). Life cycle energy performances and environmental impacts of a prefabricated building module. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *92*, 272–283. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.059

Tuohy, P. G., & Murphy, G. B. (2015). Are current design processes and policies delivering comfortable low carbon buildings? *Architectural Science Review*, *58*(1), 39–46. https://doi.org/10.1080/00038628.2014.975779

Valibeigi, M., Taghipour, A. A., & Feshari, M. (2019). Housing price estimation in order to sustainable housing: Niyavaran area, Tehran, Iran. *A/Z ITU Journal of the Faculty of Architecture*, *16*(1), 43–52. https://doi.org/10.5505/itujfa.2019.40326

Werner, J.-M. (2013). Self-sustaining home: Design liaises technology. *Green Design, Materials and Manufacturing Processes - Proceedings of the 2nd International Conference on Sustainable Intelligent Manufacturing, SIM 2013*, 749 – 753. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84880096519&partnerID=40&md5=8b6bebb810a14a6ce453bb9f9ebf7b5c

Winston, N. (2022). Sustainable community development: Integrating social and environmental sustainability for sustainable housing and communities. *Sustainable Development*, *30*(1), 191–202. https://doi.org/10.1002/sd.2238

Xiao, L., Qiu, Q., & Gao, L. (2016). Chinese housing reform and social sustainability: Evidence from post-reform home ownership. *Sustainability (Switzerland)*, *8*(10). https://doi.org/10.3390/su8101053