BIOMIMETISMO COMO ESTRATEGIA PARA MEJORAR LA SOSTENIBILIDAD Y EFICIENCIA EN LA CONSTRUCCIÓN COLOMBIANA

Andres Giovanni Castiblanco Galindo

Andres Felipe Forero Soto

UNIVERSIDAD DE LA SALLE

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

BOGOTA D.C

2024

Biomimetismo como estrategia para mejorar la sostenibilidad y eficiencia en la construcción colombiana

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de ingeniero civil

Andres Giovanni Castiblanco Galindo

Andres Felipe Forero Soto

Director temático

MsC. Sandra Liliana Uribe Celis

Universidad de la Salle

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

Bogotá D.C

2024

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a la ingeniera Sandra Uribe Celis, directora temática de esta investigación, por su apoyo, disposición y confianza en cada paso de nuestro proceso formativo. Su guía y compromiso fueron fundamentales para alcanzar los objetivos de este proyecto. Extendemos también nuestro reconocimiento a la Universidad de La Salle y a su cuerpo docente, cuya orientación profesional ha sido esencial para nuestro crecimiento ético e intelectual a lo largo de esta experiencia académica.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia, quienes han sido mi mayor apoyo en esta etapa de formación profesional. Gracias por estar siempre a mi lado, brindándome amor y sabios consejos que me han guiado para convertirme en una mejor persona. A mi madre y a mi abuela, especialmente, por el amor incondicional que me han entregado y por estar presentes en cada tropiezo y logro de mi vida. Finalmente, extiendo mi gratitud a todos los docentes y compañeros que he conocido en esta experiencia académica, quienes han contribuido a fortalecer mi conocimiento profesional y ético.

Andres Giovanni Castiblanco Galindo.

Dedico esta tesis al poder de la naturaleza que nos permite existir y que con la perfección de sus procesos nos enseña que podemos convivir con ella de una manera más amorosa y respetuosa. A mis padres quienes me dieron la vida y han sido mi apoyo incondicional en cada etapa de esta, siempre guiado por su tenacidad y cariño me han impulsado a ser una mejor persona. A mis hermanos cuyas sabias palabras me han ayudado a enfrentar con valentía y claridad las situaciones difíciles y a ver el mundo con una perspectiva más amplia. A mi novia, quien ha sido un apoyo invaluable, demostrando su amor y compromiso con mi bienestar. Y finalmente a mi compañero de tesis por su disposición y entrega en este proceso. A todos ellos, les dedico este logro con gratitud y amor.

Andres Felipe Forero Soto.

Resumen

La industria de la construcción en el país, caracterizada por prácticas convencionales que consumen grandes cantidades de recursos naturales y producen impactos ambientales significativos aborda grandes desfios en temas de sostenibilidad, lo cual hacer plantear la necesidad de enfoques innovadores, como el biomimetismo, que se basa en imitar estrategias naturales para mejorar el diseño y los materiales en la construcción, con el fin de optimizar la eficiencia en el uso de recursos y minimizar el impacto ambiental.

Es por ello que, el objetivo principal de esta investigación es analizar el potencial del biomimetismo para mejorar la durabilidad, eficiencia energética y reducción de residuos en edificaciones en Colombia, proporcionando una estrategia innovadora para la industria. La metodología empleada es cualitativa y descriptivo-analítica, fundamentada en una revisión bibliográfica sistemática y el uso de herramientas de análisis estratégico como el PESTEL y DOFA, que permiten identificar tanto los factores externos e internos que afectan la implementación de estas prácticas en el sector colombiano.

Los resultados destacan beneficios potenciales del biomimetismo, como la mejora en la resistencia de materiales y eficiencia energética de edificaciones, además de contribuir a la reducción de residuos. Finalmente, se concluye que la adopción de estrategias bioinspiradas puede transformar el sector hacia una construcción más sostenible y competitiva, recomendando la integración de prácticas biomiméticas adaptadas al contexto colombiano.

Palabras clave: biomimetismo, sostenibilidad, eficiencia energética, reducción de residuos, durabilidad

Abstract

The construction industry in Colombia, characterized by conventional practices that consume large amounts of natural resources and produce significant environmental impacts, faces major sustainability challenges. This context emphasizes the need for innovative approaches, such as biomimicry, which draws on biological solutions to improve construction design and materials, with the aim of optimizing resource efficiency and reducing environmental impact.

The main objective of this research is to analyze the potential of biomimicry to enhance durability, energy efficiency, and waste reduction in buildings in Colombia, providing an innovative strategy for the industry. The methodology is qualitative and descriptive-analytical, based on a systematic literature review and strategic analysis tools such as PESTEL and SWOT, which help identify both external and internal factors influencing the implementation of these practices in the Colombian sector.

The results highlight the potential benefits of biomimicry, including improvements in material strength and building energy efficiency, along with waste reduction. The study concludes that adopting bio-inspired strategies could shift the sector towards more sustainable and competitive construction practices, recommending the integration of biomimetic solutions tailored to the Colombian context.

Keywords: Biomimicry, Sustainability, Energy Efficiency, Waste Reduction, Durability

Contenido

Glosario **11**
1. Introducción **15**
2. Problemática **17**
2.1 Descripción del Problema 17
2.2 Justificación 18
2.3 Beneficios 19
2.3.1 Reducción del Impacto Ambiental 19
2.3.2 Eficiencia Energética 20
2.3.3 Durabilidad y Resiliencia 20
2.3.4 Gestión Eficiente del Agua 21
2.3.5 Adaptabilidad y Confort 21
3. Antecedentes **22**
3.1 Diseño de edificaciones 22
3.1.1 Durabilidad 22
3.1.2 Eficiencia Energética 24
3.2 Materiales 26
3.2.1 Durabilidad 26
3.2.2 Eficiencia Energética 28
3.2.3 Reducción de Residuos 31
4. Objetivos **34**
1.1 Objetivo General 34
1.2 Objetivos Específicos 34
5. Marco de Referencia **35**
5.1 Marco Teórico 35
5.1.1 Biomimetismo en la Construcción 35
5.1.2 Sostenibilidad en la Construcción 36
5.1.3 Eficiencia Energética 38
5.1.4 Durabilidad y Vida Útil en Materiales y Estructuras 38
5.1.5 Reducción de Residuos y Economía Circular 39
5.1.6 Análisis PESTEL 41
5.2 Marco Legal 43
6. Metodología **46**
6.1 Diseño de la Investigación 46
6.1.1 Tipo de Investigación 46

6.2 Recolección de Datos 46
6.2.1 Revisión Bibliográfica Sistemática 46
6.2.3 Modelos de Análisis Estratégico 46
6.3 Análisis de Datos 47
6.3.1Evaluación de Durabilidad, Eficiencia Energética y Reducción de Residuos 47
6.3.2 Análisis PESTEL y DOFA 47
6.3.3 Recomendaciones 47
6.4 Elaboración del Documento Final 47
7. Resultados y Análisis 48
7.1 Análisis literario 48
7.2 Evaluaciones de Sostenibilidad 51
7.2.1 Durabilidad 51
7.2.2 Eficiencia Energética 62
7.2.3 Reducción de residuos 66
7.3 Análisis de factores externos 71
7.3.1 Político 71
7.3.2 Económico 74
7.3.3 Sociocultural 76
7.3.4 Tecnológico 81
7.3.5 Ecológico 83
7.3.3 Legal 85
7.4 Matriz PESTEL 88
7.5 Análisis de factores internos 91
7.5.1 Fortalezas 91
7.5.2 Debilidades 96
7.6 Matriz DOFA 100
7.7 Desarrollo de Estrategias y Recomendaciones 103
7.7.1 Estrategias para la Aplicación del Biomimetismo 103
7.7.2 Estrategias para Potenciar las Fortalezas 105
7.7.3 Estrategias para Mitigar las Debilidades 106
7.7.4 Estrategias para Aprovechar las Oportunidades 108
7.7.5 Estrategias para Contrarrestar las Amenazas 109
8. Conclusiones 110
Referencias 114

Lista de tablas

Tabla 1 *Normatividad vigente nacional e internacional* 43
Tabla 2 *Factores para la estimación de la vida útil de las construcciones en Colombia* 51
Tabla 3 *Comparación del impacto ambiental de un bloque de micelio en sustrato de cáñamo vs materiales convencionales* 69
Tabla 4 *Iniciativas gubernamentales para la construcción sostenible* 71
Tabla 5 *Políticas de importación* 73
Tabla 6 *Iniciativas y tratados internacionales de construcción sostenible* 73
Tabla 7 Fuentes y productos financieros 75
Tabla 8 *Ejemplos globales basados en biomimetismo* 80
Tabla 9 *Desarrollos tecnológicos de construcción en Colombia* 81
Tabla 10 *Normativa vigente construcción sostenible* 85
Tabla 11 *Normativa ambiental en Colombia* 86
Tabla 12 *Marco legal de propiedad intelectual en Colombia* 87
Tabla 13 *Matriz PESTEL* 89
Tabla 14 *Proyectos de construcción sostenible en Colombia* 91
Tabla 15 *Practicas biomiméticas en universidades de Colombia* 92
Tabla 16 *Matriz DOFA* 102

Lista de Figuras

Figura 1 Comportamiento de fachadas como envolventes 16
Figura 2 Estructura concha nácar y desplazamiento horizontal en ladrillos comunes y ondulados..... 23
Figura 3 Estructura y aplicación de panal biónico..... 24
Figura 4 Sistema bioinspirado de fachada de vidrio 25
Figura 5 Diseño bioclimático de vivienda rural 26
Figura 6 Autorreparación del concreto mediante bacteria Bacillus..... 27
Figura 7 Fabricación de material compuesto tipo nácar 28
Figura 8 Vigas con piedras fotoluminiscentes..... 29
Figura 9 Proyección de material a base de Micelio 30
Figura 10 Ladrillos a partir de residuos de vidrio y plástico..... 31
Figura 11 Superficies de materiales fotocatalíticos 32
Figura 12 Principios biomiméticos 35
Figura 13 Consideraciones mínimas de la construcción sostenible en un proyecto..... 37
Figura 14 Principios de la economía circular 40
Figura 15 Elementos en el análisis PESTEL..... 41
Figura 16 Matriz de análisis literario en materiales biomiméticos 49
Figura 17 Matriz de análisis literario en diseño de edificaciones biomiméticas..... 50
Figura 18 Matriz de evaluación de la durabilidad 55
Figura 19 Matriz de evaluación de la eficiencia energética 63
Figura 20 Matriz de evaluación de reducción de residuos 67
Figura 21 *Sistema de ahorro de agua y energía* 76
Figura 22 *Hogares que realizan al menos una práctica para reducir el consumo de agua o energía* 77
Figura 23 *Urbanización en Colombia de 2013 a 2023*..... 79
Figura 24 *Nivel de influencia en la decisión de compra de vivienda sostenible* 95

Glosario

Adaptación de Envolventes: La envolvente de una edificación es el conjunto de elementos constructivos que separan y protegen el interior de la estructura del ambiente exterior. Incluye componentes como fachadas, techos, cubiertas, muros, ventanas, puertas y pisos en contacto con el entorno. La adaptación de envolventes se refiere a la capacidad de las superficies exteriores de los edificios para responder a las condiciones ambientales. Inspirándose en la termorregulación de organismos en áreas áridas, se pueden desarrollar envolventes que regulen el calor, la ventilación, la gestión del agua y el control de la luz (Badarnah, 2012).

Bioluminiscencia: Se refiere a la capacidad de ciertos materiales para emitir luz visible como resultado de reacciones químicas internas, similares a las observadas en organismos vivos como luciérnagas y algunos hongos. Este fenómeno se logra mediante la incorporación de compuestos luminiscentes, como la luciferina y la luciferasa, en matrices materiales, permitiendo aplicaciones en sensores, dispositivos de iluminación y bioimagenología (Bioluminiscencia: Qué Es y Ejemplos, s. f.).

Conductividad térmica: Indica la capacidad de un material para conducir el calor, y depende de su composición y no de su geometría. Se define como la cantidad de calor que se transfiere a través de una unidad de área de un material en una dirección perpendicular al área, por unidad de tiempo y por unidad de gradiente de temperatura. (Chapman, 2006).

Termorregulación: Es la capacidad que tiene un material u organismo de retener el calor y liberarlo lentamente para así tener una temperatura estable (Materiales Termorreguladores Con Capacidad de Regular Su Temperatura, 2024).

Resiliencia: Es la capacidad del material para absorber la energía al deformarse de manera eficaz bajo una tensión, y liberar la energía al eliminar dicha tensión. Se entiende por resiliencia a la energía máxima que puede ser absorbida sin causar una deformación permanente (Ensayo de Propiedades Mecánicas de Materiales, s. f.).

Resistencia: En el contexto de los materiales de construcción, este concepto se refiere a la capacidad de un material para soportar fuerzas o cargas sin experimentar fallos estructurales como deformaciones permanentes o fracturas. Este término es fundamental en el diseño y análisis estructural, ya que determina la idoneidad de un material para soportar condiciones de carga específicas. La resistencia de un material puede diferir significativamente según se le someta a tracción, compresión, flexión o torsión (Cervera et al. 2015).

Ductilidad: Se define como la capacidad de un material para deformarse plásticamente sin llegar a romperse. Un material se considera dúctil si es capaz de sufrir una deformación permanente y apreciable dentro del rango inelástico antes de fallar. La ductilidad es esencial, ya que influye tanto en la capacidad de absorción de energía como en la disipación de energía de un material. (Rotondo & Barbat, 2020).

Huella de Carbono: La huella de carbono representa la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero que se emitieron a la atmósfera por medio de alguna actividad humana, que puede ser un producto o un servicio, o por la acción diaria de un habitante (National Geographic España, 2024).

Impacto Ambiental: Según el *decreto 1076 de 2015* se define como cualquier alteración en el medio ambiental biótico, abiótico y socioeconómico, que sea adverso o beneficioso, total o parcial, que pueda ser atribuido al desarrollo de un proyecto, obra o actividad (Min Ambente, 2015).

Factores Externos según Análisis DOFA: Según Valenzuela (2014), son elementos del entorno que afectan al sector de la construcción y sobre los cuales este tiene poco o ningún control y se clasifican en:

- Oportunidades**:** Condiciones externas que, si se aprovechan adecuadamente, pueden beneficiar al sector, como políticas gubernamentales de inversión en infraestructura, crecimiento económico que impulsa la demanda de edificaciones, avances tecnológicos aplicables a la construcción y tendencias hacia la sostenibilidad ambiental.

- Amenazas: Condiciones externas que pueden perjudicar al sector, como fluctuaciones en los precios de los materiales, cambios desfavorables en las regulaciones ambientales, competencia internacional, crisis económicas y desastres naturales que afectan la continuidad de las obras.

Factores internos según análisis DOFA: Son elementos propios del sector de la construccion que pueden influir en su desempeño y competitividad (Valenzuela, 2014). Estos factores están bajo el control directo de las entidades que conforman el sector y se dividen en:

- Fortalezas: Aspectos positivos internos que proporcionan ventajas competitivas al sector, como la disponibilidad de mano de obra calificada, la adopción de tecnologías avanzadas, la existencia de normativas claras y la capacidad de innovación en técnicas constructivas.
- Debilidades: Aspectos negativos internos que pueden obstaculizar el desempeño del sector, como la falta de capacitación continua, deficiencias en la gestión de proyectos, problemas de calidad en las obras y limitaciones en la infraestructura logística.

Autorreparación: Se refiere a la capacidad intrínseca de ciertos materiales para identificar y reparar daños, como microfisuras o arañazos, sin intervención externa. Este proceso se inspira en sistemas biológicos que poseen habilidades regenerativas, permitiendo que el material recupere su integridad estructural y funcionalidad tras sufrir daños (Muesmann, 2020)

Materiales Fotocatalíticos: Son sustancias que, al ser irradiadas con luz adecuada, generalmente en el espectro ultravioleta, actúan como catalizadores en reacciones químicas que descomponen contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el aire y en las superficies (Luis, 2024).

Tenacidad: Es una propiedad mecánica que indica la capacidad de un material para absorber energía y deformarse plásticamente antes de fracturarse. Se relaciona con la resistencia del material a la

propagación de grietas y se mide generalmente mediante pruebas de impacto o ensayos de fractura (Pérez, 2024).

Corrientes Convectivas: son movimientos de fluidos inducidos por diferencias de temperatura y densidad dentro del mismo, este fenómeno ocurre cuando una porción del fluido se calienta, disminuye su densidad y asciende, mientras que las porciones más frías descienden, estableciendo un ciclo continuo de circulación. Las corrientes convectivas son fundamentales en procesos como la transferencia de calor en la atmósfera, océanos y en sistemas de calefacción y refrigeración (lifeder, 2022).

Ventilación Pasiva: Es una estrategia de diseño arquitectónico que utiliza movimientos naturales del aire, sin la intervención de sistemas mecánicos, para ventilar y refrescar espacios interiores. Aprovecha principios como la convección natural, la presión del viento y la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior para promover la circulación del aire, mejorando la calidad ambiental y reduciendo el consumo energético (Galeondev, 2022).

Transmitancia Térmica: Este valor permite conocer su nivel de aislación térmica en relación al porcentaje de energía que lo atraviesa; si el número resultante es bajo tendremos una superficie bien aislada y, por el contrario, un número alto alerta de una superficie deficiente térmicamente.

1. Introducción

La industria de la construcción en Colombia enfrenta grandes desafíos en términos de sostenibilidad y eficiencia, ya que por su dependencia de métodos tradicionales aumentan el consumo de recursos naturales y energéticos, así como la generación de residuos (Cala, 2023). Este sector es uno de los principales contribuyentes a las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial, además de utilizar grandes cantidades de agua y materiales (AlAli et al., 2023). En este contexto, el biomimetismo, definido como la ciencia que imita las formas, sistemas y procesos naturales para inspirar soluciones innovadoras y sostenibles, emerge como una estrategia prometedora para optimizar los recursos y minimizar el impacto ambiental generado (Hwang et al., 2015).

A nivel global, se han desarrollado numerosos estudios que demuestran cómo los principios biomiméticos pueden aplicarse en el campo de la ingeniería civil y construcción, proporcionando edificaciones que son más resilientes y con una mayor eficiencia en el uso de recursos. Ejemplos notables incluyen materiales de construcción inspirados en la resistencia de las estructuras naturales, como los ladrillos de adobe estabilizados con glicoproteínas, inspirados en los montículos de termitas, los cuales ofrecen mayor durabilidad y menor impacto ambiental (Balila y Vahdati, 2024). Además, los diseños de edificaciones con enfoques biomiméticos aplicados a la envolvente de los edificios pueden mejorar la eficiencia energética al permitir una regulación más natural de la temperatura interior, emulando la adaptación de organismos en su entorno natural (Badarnah, 2012).

Figura 1

Comportamiento de fachadas como envolventes

Nota. Adaptado de “Las fachadas cinéticas en la arquitectura biomimética”, por El Cerramiento, https://elcerramiento.mx/las-fachadas-cineticas-en-la-arquitectura-biomimetica/.

En Colombia, sin embargo, la implementación de biomimetismo en la construcción enfrenta obstáculos significativos, como la falta de regulaciones específicas, los altos costos iniciales, y la escasa capacitación en estos conceptos dentro del sector. Aun así, el potencial de esta disciplina para contribuir a la sostenibilidad de las edificaciones es considerable, proporcionando una oportunidad única para transformar prácticas constructivas convencionales en estrategias más sostenibles y adaptativas (Roldán et al., 2023).

Este proyecto de investigación busca analizar de qué manera el biomimetismo puede aplicarse en el diseño de edificaciones y materiales en Colombia, con el objetivo de mejorar la durabilidad, eficiencia energética y reducción de residuos en la construcción. Así, se pretende sentar un precedente en el ámbito de la construcción sostenible, que no solo impulse la competitividad del sector, sino que también contribuya a los objetivos nacionales e internacionales de desarrollo sostenible.

2. Problemática

2.1 Descripción del Problema

El sector de la construcción en Colombia se destaca como uno de los sectores con mayor impacto en el medio ambiente, debido a su elevado uso de energía, un uso intensivo de recursos naturales y una elevada producción de residuos. Este panorama surge de la dependencia en métodos y materiales de construcción tradicionales que, aunque son útiles para el desarrollo rápido de infraestructura, tienen restricciones significativas en cuanto a sostenibilidad y eficiencia a largo plazo. La inclinación hacia materiales convencionales como el concreto y el acero, pese a ser rentables en el corto plazo, requiere de grandes volúmenes de recursos no renovables y genera significativas emisiones de gases de efecto invernadero, intensificando el cambio climático e impactando los ecosistemas locales (Cala, 2023; Broadsword Group, 2014).

A escala mundial, la necesidad de reconsiderar los métodos de construcción ha generado enfoques sostenibles que persiguen disminuir la dependencia de recursos limitados y optimizar el consumo energético de los edificios. En este contexto, el biomimetismo emerge como una opción innovadora que replica procesos naturales con el fin de crear materiales y diseños de arquitectura más eficientes y sostenibles. La biomímesis aplicada a la construcción brinda el uso de adaptaciones biológicas que logran mejorar la utilización de recursos, tales como la regulación térmica y la resistencia estructural en seres vivos, para crear construcciones que reduzcan el uso de energía, disminuyan los residuos y prolonguen su durabilidad sin afectar al medio ambiente (Vedoya y Pilar, 2019).

No obstante, en Colombia, la aplicación de biomimetismo en el sector de la construcción se topa con múltiples obstáculos que complican su implementación. Entre las restricciones más significativas se incluyen los elevados costos iniciales en investigación y desarrollo de tecnologías bioinspiradas, la ausencia de normativas que fomenten prácticas sostenibles, y la limitada formación especializada entre los expertos en construcción. Adicionalmente, ajustar soluciones biomiméticas al entorno colombiano

supone retos debido a la variedad climática y geográfica del país, lo que requiere estrategias ajustadas para diferentes regiones (Bernal Zamudio et al., 2023).

Otro aspecto que restringe el progreso del biomimetismo en Colombia es la ausencia de cooperación interdisciplinaria. Aunque en naciones avanzadas hay redes de colaboración entre ingenieros, biólogos, arquitectos y urbanistas, en el escenario colombiano estas interacciones son escasas. Esto no solo restringe la creación de soluciones biomiméticas eficaces, sino que también disminuye la posibilidad de establecer un cimiento de saber local que promueva innovaciones sostenibiles a escala nacional. Sin un enfoque cooperativo e integrador, los proyectos enfocados en el biomimetismo pueden verse fragmentados, lo que complica el avance de tecnologías y materiales diseñados para las demandas particulares del país (Gutiérrez Astudillo y Espinosa Guzmán, 2016).

El problema propuesto destaca la imperiosa necesidad de investigar y ajustar métodos biomiméticos en el ámbito de la construcción en Colombia. La aplicación de estos principios no solo ayudaría a disminuir el impacto ambiental de los edificios y de los materiales empleados en la construcción, sino que también potenciaría la eficacia financiera a largo plazo de los proyectos, al reducir los costos operativos, prolongar la durabilidad de las estructuras y maximizar la utilización de materiales biomiméticos. En este contexto, se plantea una pregunta esencial: ¿Cómo puede el biomimetismo ser aplicado en el diseño de edificaciones y el uso de materiales para crear soluciones innovadoras y sostenibles en la industria de la construcción colombiana? Esta investigación se enfoca en tratar este tema, examinando la aplicación del biomimetismo para influir en la construcción en Colombia y estrategias concretas que faciliten su implementación.

2.2 Justificación

En Colombia, la industria de la construcción está enfrentando una creciente demanda de implementar prácticas sostenibles, teniendo en cuenta su significativo efecto en el uso de recursos naturales y la producción de emisiones contaminantes. Este sector abarca alrededor del 60% del

consumo de recursos no renovables y el 40% del consumo energético del país, además de aportar el 30% de las emisiones de CO2 y producir residuos que exceden el 20% de los materiales empleados en las construcciones (Guía de Materiales para la Construcción Sostenible, 2022). Estas cifras resaltan la importancia de investigar y aplicar estrategias innovadoras que disminuyan el impacto ambiental del sector y fomenten un crecimiento urbanístico más respetuoso con el medio ambiente.

El biomimetismo, emplea los principios y procesos naturales para solucionar problemas humanos, emerge como una opción favorable para enfrentar los retos de sostenibilidad en el área de la construcción. A través del diseño y desarrollo de materiales basados en sistemas naturales, se puede mejorar la utilización de recursos, incrementar la durabilidad de las estructuras y disminuir los costos a largo plazo. La implementación de prácticas biomiméticas en Colombia podría mejorar la eficiencia energética de las edificaciones y minimizar el consumo de recursos no renovables, contribuyendo al cumplimiento de objetivos ambientales y de sostenibilidad como los establecidos en el Plan Nacional de Desarrollo y la Estrategia Nacional de Economía Circular (Manual de Ecourbanismo y Construcción Sostenible, 2023).

Como investigadores, nuestro propósito no es solo evaluar las posibles ventajas de implementar principios biomiméticos en el sector de la construcción en Colombia, sino también sugerir estrategias eficaces para vencer los obstáculos de implementación evidenciados. Este proyecto de investigación, al recoger y analizar casos de estudio, proporcionará una guía para constructores, ingenieros y arquitectos que deseen investigar prácticas sostenibles y disminuir la dependencia de prácticas convencionales, fomentando la eficiencia de los recursos y la sostenibilidad a largo plazo en el sector de la construcción.

2.3 Beneficios

2.3.1 Reducción del Impacto Ambiental

La implementación del biomimetismo en el sector de la construcción permite disminuir la huella de carbono y mejorar la utilización de recursos no renovables, ayudando a atenuar el impacto ambiental

del sector de la construcción, que produce cerca del 40% de las emisiones de CO2 a causa del uso de energía (Jamei & Vrcelj, 2021; AlAli et al., 2023). Mediante la replicación de procedimientos naturales, se fomenta un modelo de construcción que valora la sostenibilidad y la eficiencia en el ciclo de vida de los materiales (Jamei & Vrcelj, 2021; Verbrugghe, Rubinacci & Khan, 2023).

2.3.2 Eficiencia Energética

Los diseños biomiméticos contribuyen de manera significativa a la eficiencia energética de las construcciones. En estudios como el sistema de enfriamiento inspirado en termiteros del Eastgate Centre en Zimbabue, se puede apreciar cómo el biomimetismo puede disminuir el consumo energético mediante la regulación pasiva de la temperatura, disminuyendo la necesidad de sistemas de aire acondicionado habituales (Verbrugghe et al., 2023) Estos progresos son fundamentales para establecer construcciones que mantengan un clima adecuado de forma autónoma y con un menor consumo de energía.

Otro caso notable es la inspiración en mecanismos de termorregulación observados en diferentes clases de plantas como la Fenestraria aurantiaca que controla la luz solar al capturarla y refractarla. También se puede observar la termorregulación en otros tipos de plantas que a bajas temperaturas se cierran para proteger las hojas internas evitando el sobrecalentamiento durante el día y el sobre enfriamiento en la noche. Esto se usa en el diseño de envolventes, como el uso de vidrio electrocrómico que cambia sus propiedades según la intensidad solar, reflejando la luz durante el día y funcionando como aislante térmico en la noche.

2.3.3 Durabilidad y Resiliencia

La adopción de materiales biomiméticos inspirados en estructuras naturales, tales como los caparazones de moluscos, aporta una mejora significativa en la resistencia y la durabilidad de las construcciones. Estos diseños, que refuerzan la capacidad de absorción y distribución de energía de organismos marinos, permiten crear construcciones más resilientes frente a desafíos climáticos

adversos, como fuertes vientos, lluvias intensas y variaciones térmicas. En consecuencia, las construcciones no solo presentan una duración más prolongada, sino que también requieren menos mantenimiento, lo cual se traduce en una disminución de los costos de reparación a largo plazo. Este enfoque biomimético brinda una solución sólida y sostenible para enfrentar los obstáculos actuales de la industria de la construcción (Jamei & Vrcelj, 2021; Verbrugghe et al., 2023).

2.3.4 Gestión Eficiente del Agua

El uso de sistemas biomiméticos en la construcción posibilita la adopción de ideas inspiradas en la naturaleza con el fin de optimizar la captación, almacenamiento y reutilización del agua, fundamentales en áreas con escasos recursos hídricos. Dado que aumenta la capacidad de ciertas plantas y organismos para captar y retener agua, estos sistemas posibilitan una gestión más sostenible, impulsando el uso eficiente y controlado del recurso. Se pueden citar techos verdes y sistemas de recolección de aguas pluviales, los cuales contribuyen a disminuir el consumo de agua potable en edificios y a disminuir la presión sobre fuentes naturales de agua (Jamei & Vrcelj, 2021; AlAli et al., 2023).

Existen datos cuantitativos que respaldan la eficiencia en la gestión del agua en proyectos sostenibles. Por ejemplo, en contextos urbanos y domésticos, se ha identificado que mediante tecnologías ambientalmente adecuadas, como sistemas de reciclaje de agua y captación de aguas lluvias, es posible reducir el consumo de agua potable en hasta un 50%. Esto se logra utilizando software como Wise Water para modelar los sistemas y cuantificar los ahorros potenciales, especialmente en edificios nuevos o remodelados.

2.3.5 Adaptabilidad y Confort

A través del biomimetismo, se puede diseñar espacios interiores con una regulación térmica pasiva, basada en fenómenos naturales, que aumenta la comodidad de las personas que los ocupan sin requerir de sistemas mecánicos que consuman mucha energía. La fuente de inspiración en seres vivos

como la piel de ciertos animales, que posibilita la ventilación y controla la temperatura de manera intrínseca, conduce a la creación de construcciones que se ajustan de manera más eficiente a diferentes entornos climáticos. Estos sistemas pasivos mejoran el uso de energía y mantienen la temperatura interior agradable y constante, disminuyendo la necesidad de usar aire acondicionado y calefacción (Verbrugghe et al., 2023).

3. Antecedentes

De acuerdo al enfoque de este proyecto se relacionarán investigaciones que utilicen dos aplicaciones del biomimetismo en la construcción, el primero abarca la parte del ***diseño de edificaciones*** y el segundo del ***uso de materiales***, en cada uno de ellos se evidenciaron tres beneficios que aportan al tema de sostenibilidad los cuales son la ***durabilidad, eficiencia energética y reducción de residuos***. Se exponen diferentes estudios e investigaciones tanto a nivel local como internacional:

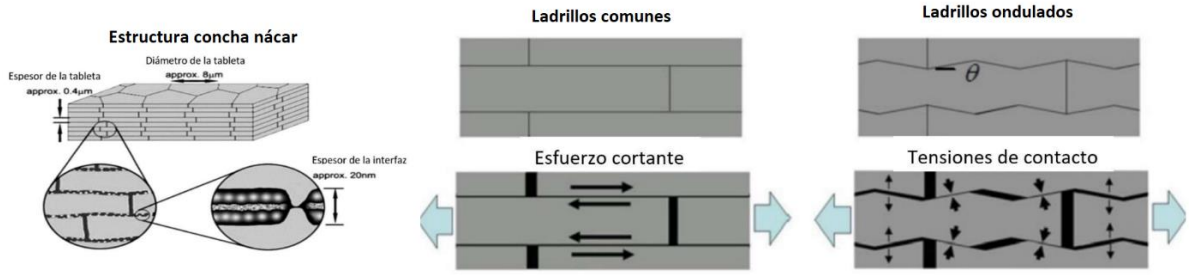
3.1 Diseño de edificaciones

3.1.1 Durabilidad

Estudio de Muros Aligerados con un Diseño Basado en la Estructura de la Concha Nácar Para Aplicaciones en Zonas Sísmicas. Esta investigación evidencia cómo el diseño de muros aligerados, inspirado en la estructura de la concha nácar, puede mejorar significativamente la distribución de esfuerzos y prevenir la aparición de fallas bajo cargas sísmicas. Este diseño bioinspirado emplea bloques de concreto espumado con una densidad seca de 1200 kg/m³, organizados con un ángulo de 3°. Los resultados indican que la incorporación de bloques con ángulos y formas onduladas contribuye a aumentar la carga máxima promedio de 5766.09 N a 5819.06 N y el esfuerzo máximo promedio de 15.98 MPA a 16.13 Mpa en la prueba de compresión digital (Barthelat et al., 2012).

Figura 2

Estructura concha nácar y desplazamiento horizontal en ladrillos comunes y ondulados



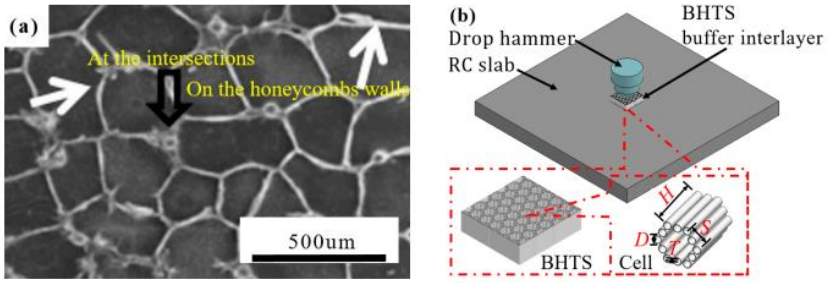
Nota. Adaptado de "Estudio de muros aligerados con un diseño basado en la estructura de la concha nácar para aplicaciones en zonas sísmicas" (p. 19), por A. Mena, 2021, Centro de Investigación Científica de Yucatán.

Como se observa en la Figura 2, los ladrillos ondulados ayudan a distribuir de manera uniforme las tensiones de contacto y el esfuerzo cortante a lo largo de la estructura, en contraste con los ladrillos comunes, donde las tensiones tienden a concentrarse en puntos específicos. Esta configuración reduce la concentración de esfuerzos localizados y facilita una mejor dispersión de la deformación en toda la estructura. En pruebas experimentales y simulaciones computacionales, estos muros bioinspirados demostraron un aumento del 10% en la resistencia a la carga máxima promedio, lo cual sugiere una prolongación en la vida útil de las estructuras y una reducción de los costos de mantenimiento debido a una menor incidencia de daños estructurales (Mena, 2021).

Comportamientos Protectores de la Estructura de Columna de Panal de Pared Delgada Bioinspirada Contra Losas de Hormigón Armado Bajo Carga de Impacto. Esta investigación evidencia que la estructura de panal bioinspirado de pared delgada, inspirada en los élitros de algunos escarabajos, puede incrementar notablemente su capacidad para absorber energía y disminuir el daño en losas de concreto reforzado expuestas a impactos. Este diseño bioinspirado funciona como una capa de amortiguación, resguardando el concreto a través de la distribución de tensiones y la reducción de la deformación acumulada.

Figura 3

Estructura y aplicación de panal biónico



Nota. Adaptado de "Protective Behaviors of Bio-Inspired Honeycomb Column Thin-Walled Structure against RC Slab under Impact Loading" (p. 73), por A. Wang & Xia, 2023, Biomimetics, 8(1).

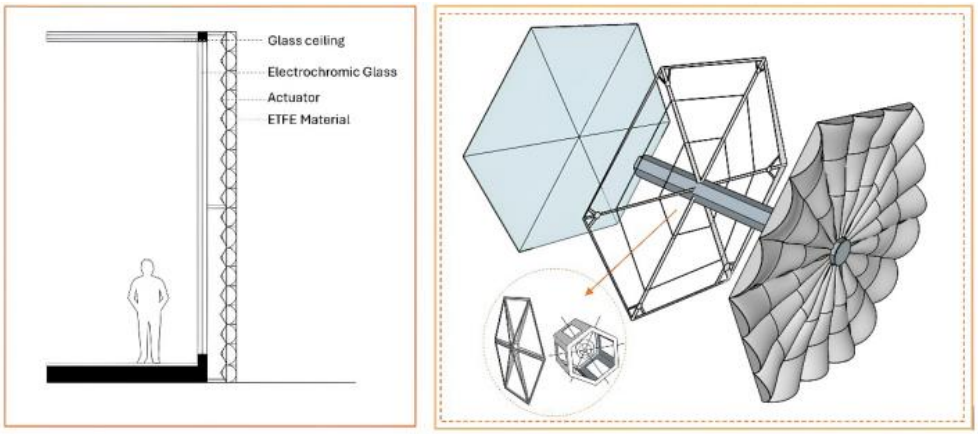
En la figura 3 se puede observar la estructura tipo panal. Este tipo de estructura permite una distribución uniforme de las tensiones de contacto durante el impacto, en contraste con los sistemas sin capa de amortiguación, donde las tensiones se concentran en zonas específicas. En pruebas experimentales y simulaciones computacionales, la capa de amortiguación mostró una reducción del desplazamiento máximo en la losa de hasta un 25 % y una disminución de la deformación residual en un 18 %, lo cual sugiere una prolongación en la vida útil en estructuras (Wang & Xia, 2023).

3.1.2 Eficiencia Energética

Mejora de la Eficiencia Energética en Fachadas de Vidrio Mediante Estrategias de Diseño Biomimético. Esta investigación examina la aplicación biomimética en fachadas de vidrio como una táctica para aumentar la eficiencia energética, utilizando técnicas de termorregulación inspiradas en la naturaleza. Específicamente, se implementó un sistema de doble piel que se basa en principios naturales de termorregulación como la Fenestraria aurantiaca, una planta que controla la luz solar al capturarla y refractarla. Esto se aplicó a una fachada de vidrio de una ampliación moderna del baño histórico Süleyman Pasha (Turquía), situado en un área de gran exposición al sol. Este diseño permite reducir las cargas de calefacción y refrigeración, manteniendo el confort térmico en el interior del edificio.

Figura 4

Sistema bioinspirado de fachada de vidrio



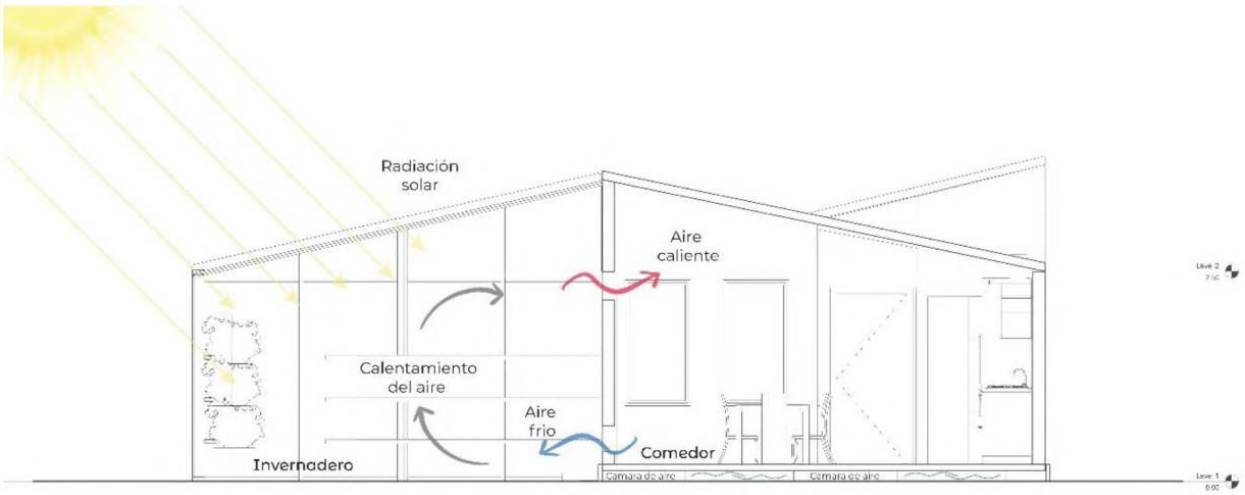
Nota. Adaptado de "Mejora de la eficiencia energética en fachadas de vidrio mediante estrategias de diseño biomimético" (p. 40), por A. Öztürk, Mutlu & Arslan, 2024, Revista Hábitat Sustentable, 14(1).

En las simulaciones energéticas llevadas a cabo con el software Design-Builder, se contrastaron tres escenarios de fachada: la fachada de vidrio original, una fachada con vidrio electrocrómico de una sola capa y una fachada de doble capa con revestimiento reflectante. Los hallazgos señalaron una disminución del 16% en la carga de calefacción y refrigeración en el segundo escenario y un avance aún más significativo, del 32%, en el tercer escenario con la fachada de doble nivel. Estos hallazgos subrayan que la utilización de materiales y sistemas esculpidos en la naturaleza puede incrementar notablemente la eficiencia energética de construcciones en condiciones climáticas severas (Öztürk et al., 2024).

Propuesta de Diseño de una Vivienda Rural Sostenible bio Inspirada Para el Municipio de Paipa, Boyacá-Colombia. Este estudio propone una vivienda rural sostenible en Paipa, Boyacá, inspirada en las estrategias de captación y retención de calor en condiciones extremas de alta radiación solar y bajas temperaturas. Dentro de la vivienda concebida se encuentran elementos bioclimáticos inspirados en el frailejón, como un invernadero adosado y un sistema de circulación de aire, que posibilitan aprovechar al máximo la radiación solar e incrementar la eficiencia energética de la estructura.

Figura 5

Diseño bioclimático de vivienda rural



Nota. Adaptado de "Propuesta de diseño de una vivienda rural sostenible bio inspirada para el municipio de Paipa, Boyacá-Colombia" (p.33), por A. Balcucho, Sánchez & Berrio, 2020, ARQUITECNO, 16.

Como se puede apreciar en la Figura 5, el diseño emplea el calor del sol para calentar el aire en el invernadero, lo cual posteriormente se distribuye en el interior de la vivienda, disminuyendo la demanda de sistemas artificiales de calefacción y promueven un entorno térmico acogedor. Además, la disposición modular de la vivienda permite optimizar el uso de la luz natural, reduciendo el consumo energético en un rango de 30% a 50% al habitual (Escalante et al., 2020).

3.2 Materiales

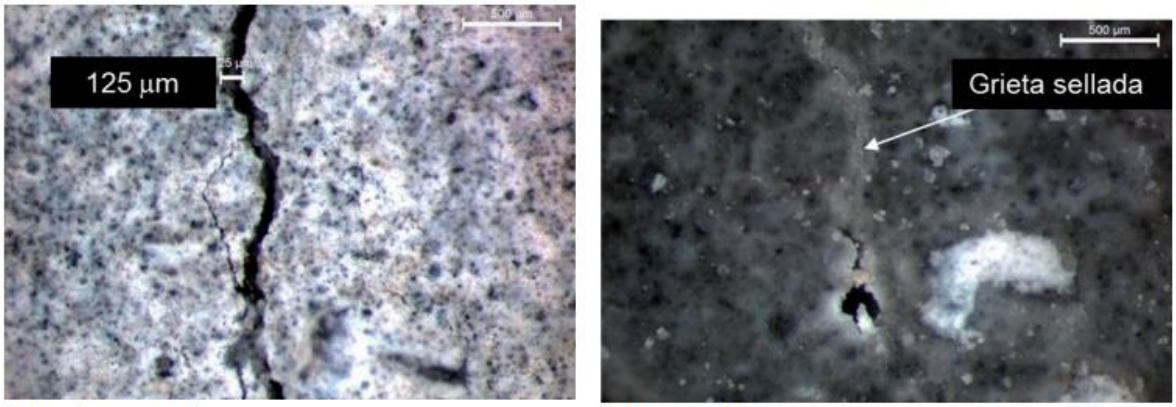
3.2.1 Durabilidad

Hormigón Autorreparable con Bacterias y Reforzado con Fibras Naturales: Principios y Aplicaciones en Ecuador. Este estudio analiza la aplicación de un concreto autorreparable reforzado con bacterias y fibras naturales, inspirado en procesos biológicos de autorreparación, como una estrategia para prolongar la durabilidad y resistencia de estructuras expuestas a condiciones ambientales adversas. Se emplearon bacterias de la especie Bacillus cohnii en el concreto empleado, las cuales, al activarse en

presencia de agua, generan carbonato cálcico ($CaCO_3$) que cierra automáticamente las grietas generadas.

Figura 6

Autorreparación del concreto mediante bacteria Bacillus



(a) Antes de auto-reparación. (a) Seis semana después.

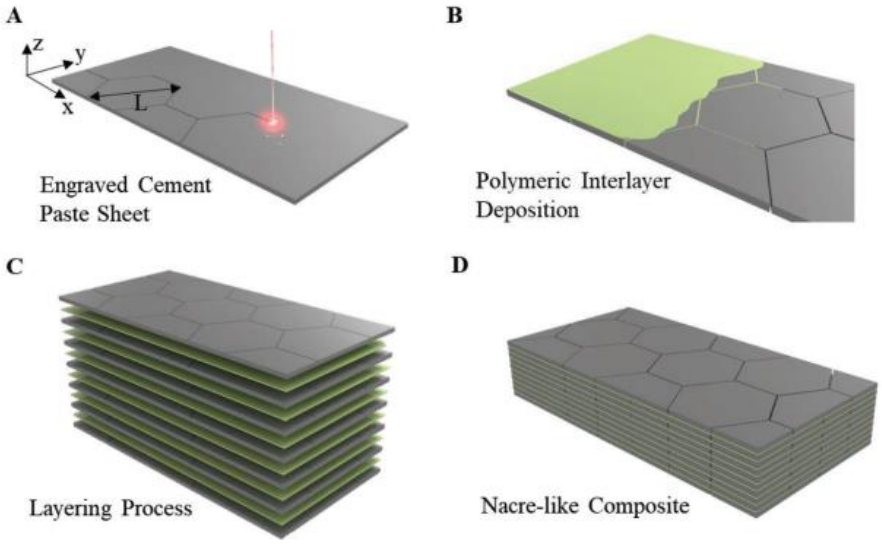
Nota. Adaptado de "Hormigón autorreparable con bacterias y reforzado con fibras naturales: Principios y aplicaciones en Ecuador" (p. 211), por A. Sierra, Mera & Jonkers, 2016, *Alternativas*, 17(3).

Como se puede apreciar en la Figura 6, el concreto autorreparable presentó fisuras de aproximadamente 125 µm que, tras seis semanas en contacto con agua, se sellaron completamente mediante la precipitación de carbonato cálcico. Esto no solo mejora la capacidad de autorreparación del concreto, sino que también contribuye a prolongar la vida útil de las estructuras, al reducir la penetración de agentes corrosivos como agua y cloruros, que son conocidos por acelerar el proceso de corrosión del refuerzo y el deterioro del material (Sierra et al., 2016).

Compuestos Cementantes Estructurados Tipo Nácar, Resistentes y Dúctiles. Este estudio examina la elaboración de compuestos cementantes basados en la estructura del nácar, reconocidos por su elevada resistencia y ductilidad, atributos cruciales para incrementar la vida útil de los materiales en la ingeniería civil. Mediante un procedimiento de producción que implica el grabado láser de láminas de cemento con el fin de crear patrones de hexágono e incluye una capa intermedia de polivinilsiloxano (PVS), se consigue un material en capas que reproduce la disposición "ladrillo y mortero" del nácar.

Figura 7

Fabricación de material compuesto tipo nácar



Nota. Adaptado de "Tough and Ductile Architected Nacre-Like Cementitious Composites. *Advanced Functional Materials*" (p. 3), por A. Sierra, Mera & Jonkers, 2016, *Alternativas*, 17(3).

Como se ilustra en la Figura 7, este procedimiento posibilita que los compuestos cementantes de tipo nácar repartan las tensiones de forma más eficaz, lo que alarga la aparición de grietas y aumenta la resistencia a fracturas. Los hallazgos experimentales revelaron que este diseño bioinspirado aumenta hasta 17.1 veces la resistencia a la fractura en comparación con el cemento tradicional, lo cual alcanzó cifras de resistencia de 73.68 MPa. √mm (Gupta et al., 2024). Asimismo, la elaboración de tabletas separadas posibilita que las capas de cemento se deslicen entre sí durante el proceso de deformación, lo cual posibilita una absorción de energía superior sin una pérdida inesperada. Por lo que, se mejora la resistencia y la durabilidad del material.

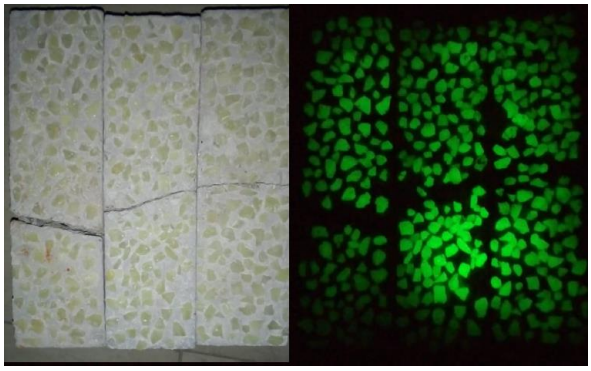
3.2.2 Eficiencia Energética

Influencia de las Piedras Fotoluminiscentes en la Iluminación y las Propiedades Mecánicas del Concreto. Esta investigación examina la utilización de piedras fotoluminiscentes incrustadas en el concreto como una táctica biomimética para incrementar la eficiencia energética en el sector de la

edificación. Este concreto fotoluminiscente, inspirado en seres que absorben y emiten luz de forma natural, se creó con el objetivo de guardar energía lumínica durante el día y liberarla en la oscuridad, ofreciendo iluminación sin requerir energía eléctrica.

Figura 8

Vigas con piedras fotoluminiscentes



Nota. Adaptado de "Influencia de las piedras fotoluminiscentes en la iluminación y las propiedades mecánicas del concreto" (p. 291), por A. Medina & Moreno, 2018, Universidad Privada del Norte.

En la Figura 8 ilustra la organización de las piedras fotoluminiscentes incrustadas en vigas de hormigón, donde su carga de luz es perceptible incluso tras la falta de luz solar. Los datos experimentales señalan que el concreto fotoluminiscente conserva una iluminación media de 5.08 ± 0.19 lux a 15 cm de altura y de 4.32 ± 0.19 lux a 40 cm de altura, lo que se ajusta a los criterios de iluminación mínima definidos en la norma UNE 23035. Este sistema posibilita disminuir el uso de energía eléctrica para la iluminación, particularmente en proyectos de infraestructura urbana y vial (Medina & Moreno, 2018).

Adicionalmente, según los resultados expresados por Medina y Moreno, 2018, se evidencia que en las probetas de concreto convencional se obtuvo una resistencia a la compresión de 330.31±6.96 kgf/cm2, mientras que en la dosificación de 0.152 kg/m2 de piedras fotoluminiscentes se obtuvo 329.23±5.77 kgf/cm2, en la dosificación de 0.765 kg/m2 se obtuvo 331.85±4.77 kgf/cm2 y finalmente en la dosificación 0.905 kg/m2 se obtuvo 333.43±4.50 kgf/cm2; en el análisis estadístico estos resultados

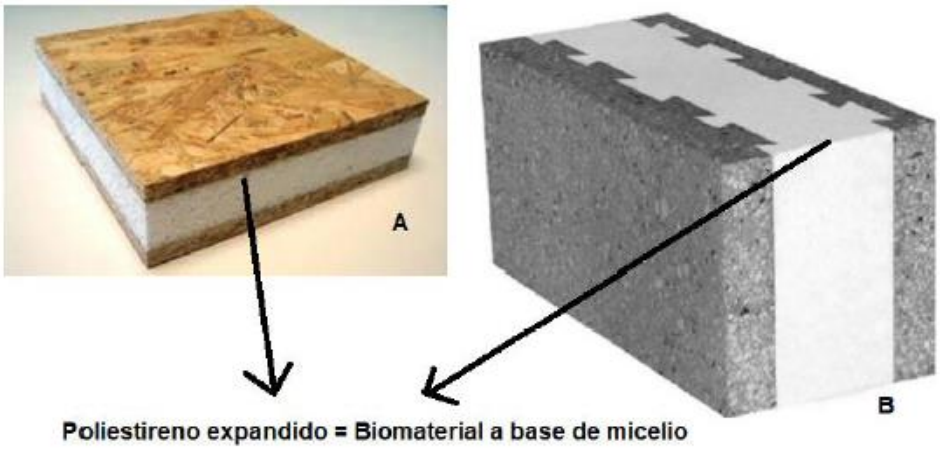
no representan diferencia alguna, por lo que se afirma que la incrustación de piedras fotoluminiscentes no interviene en la resistencia a la compresión.

Desarrollo de Biomaterial a Base de Micelio y Residuos Madereros Para el Campo de la Construcción. Este estudio analiza el desarrollo de un material a base de Micelio, el cual se utiliza como una opción sostenible al poliestireno expandido en la construcción. El Micelio, elaborado a partir de residuos madereros y cultivado mediante procedimientos controlados, actúa como un aglutinante natural que posibilita la elaboración de paneles con propiedades térmicas y acústicas competitivas.

El costo biológico del sistema basado en micelio y residuos madereros es relativamente bajo, ya que este sistema aprovecha desechos de madera, reduciendo la necesidad de extracción adicional de recursos y promoviendo un ciclo de vida más sostenible.

Figura 9

Proyección de material a base de Micelio



Nota. A: Sándwich de fibras orientadas. B: Sándwich con placas de hormigón. Adaptado de “Desarrollo de biomaterial a base de micelio para aplicaciones en la construcción sostenible” (p. 99), por A. Gómez & Martínez, 2023, Universidad Nacional de Colombia.

Como se puede apreciar en la Figura 9, el biomaterial de Micelio reemplaza al poliestireno expandido, manteniendo las habilidades de aislamiento, pero con una evaluación ambiental

significativamente menor. En las pruebas realizadas, este material presentó una conductividad térmica de aproximadamente 0.082 W/m·K, lo que lo convierte en un excelente aislante térmico para construcciones que requieren un control eficiente de la temperatura (Gómez & Martínez. 2023).

3.2.3 Reducción de Residuos

Evaluación de las Propiedades Mecánicas de Ladrillos Elaborados con Residuos de Vidrio y Plástico. Análisis de las Emisiones de Dióxido de Carbono. Este estudio expone la producción de ladrillos a partir de desechos de vidrio y plástico, empleando una metodología basada en el biomimetismo la estructura en capas de los caparazones de moluscos los cuales combinan minerales y proteínas. La aplicación de estos materiales simplifica el uso de residuos industriales en la construcción, disminuyendo la obtención de recursos naturales y las emisiones de carbono.

Figura 10

Ladrillos a partir de residuos de vidrio y plástico

(a) Molde para preparación (b) Espécimen preparado

Nota. Adaptado de “Aprovechamiento sostenible de residuos poliméricos como agregados del concreto: una revisión” (p. 65), por A. Cardona, Rengifo, Guarín, Mazo & Arbeláez, 2020, Lámpsakos, 24.

La figura 10 resalta el molde para la elaboración de los especímenes y el ladrillo que se obtiene, en el cual los desechos de plástico y vidrio se incorporan a través de un proceso de fusión regulado. Las pruebas realizadas con la mezcla de vidrio y plástico lograron una resistencia a la compresión de hasta 18.08 MPa, superando los estándares técnicos colombianos NTC 4205 (3.5 MPa), y disminuyeron las

emisiones de CO_2 en un 30% en comparación con los ladrillos tradicionales. Este tipo de productos no solo fomenten la recopilación de desechos, sino que también disminuyen el impacto ambiental asociado a la construcción convencional de ladrillos, lo cual requiere elevadas temperaturas y generan gases contaminantes (Cardona et al., 2020).

Materiales Fotocatalíticos y sus Aplicaciones en Construcción. En este estudio, se examina la capacidad de los materiales fotocatalíticos para disminuir los desechos en la edificación, inspirados en procesos naturales de oxidación avanzada, replicando la manera en que la luz solar desencadena reacciones químicas en el medio ambiente. Estos materiales, en particular los que se basan en dióxido de titanio (TiO_2), tienen la habilidad de desintegrar compuestos contaminantes al ser expuestos a la luz, fomentando de esta manera la autopurificación y la purificación del aire.

La integración de nanopartículas de TiO_2 no compromete la funcionalidad estructural de los elementos en donde se usa, siempre y cuando se consideren cuidadosamente los parámetros de composición y microestructura de cada elemento, factores básicos a tener en cuenta en la fabricación de algún material.

Figura 11

Superficies de materiales fotocatalíticos

Nota. Adaptado de “Materiales fotocatalíticos y sus aplicaciones en construcción” (p. 47), por A. Lisbona, 2016, Editorial Técnica de Construcción, Universitat Politecnica de Catalunya.

Como se muestra en la Figura 11, el gres fotocatalítico se aplica tanto en pisos como en fachadas, evidenciando su versatilidad y eficacia en diversos elementos de la edificación. Estos materiales no solo promueven la sostenibilidad debido a sus propiedades autolimpiantes y descontaminantes, sino que también disminuyen el impacto ecológico al reducir los residuos asociados al mantenimiento continuo de las superficies exteriores de las construcciones. Se han valorado en estudios que evidencian su eficacia en la reducción de gases como los NOx.

4. Objetivos

1.1 Objetivo General

Determinar cómo el biomimetismo puede ser aplicado en el diseño de edificaciones y el uso de materiales para crear soluciones innovadoras y sostenibles en la industria de la construcción colombiana, con el fin de influir positivamente en durabilidad de las obras, así como mejorar la eficiencia energética y la reducción de residuos, contribuyendo de esta manera a la sostenibilidad y competitividad del sector.

1.2 Objetivos Específicos

Evaluar la durabilidad, eficiencia energética y reducción de residuos en la construcción mediante una revisión bibliográfica sobre materiales y diseños de edificaciones con enfoques biomiméticos.

Exponer las debilidades, oportunidades fortalezas y amenazas que tendría la implementación del biomimetismo en la industria de la construcción colombiana.

Recomendar estrategias para la adopción y adaptación del biomimetismo en proyectos de construcción en Colombia.

5. Marco de Referencia

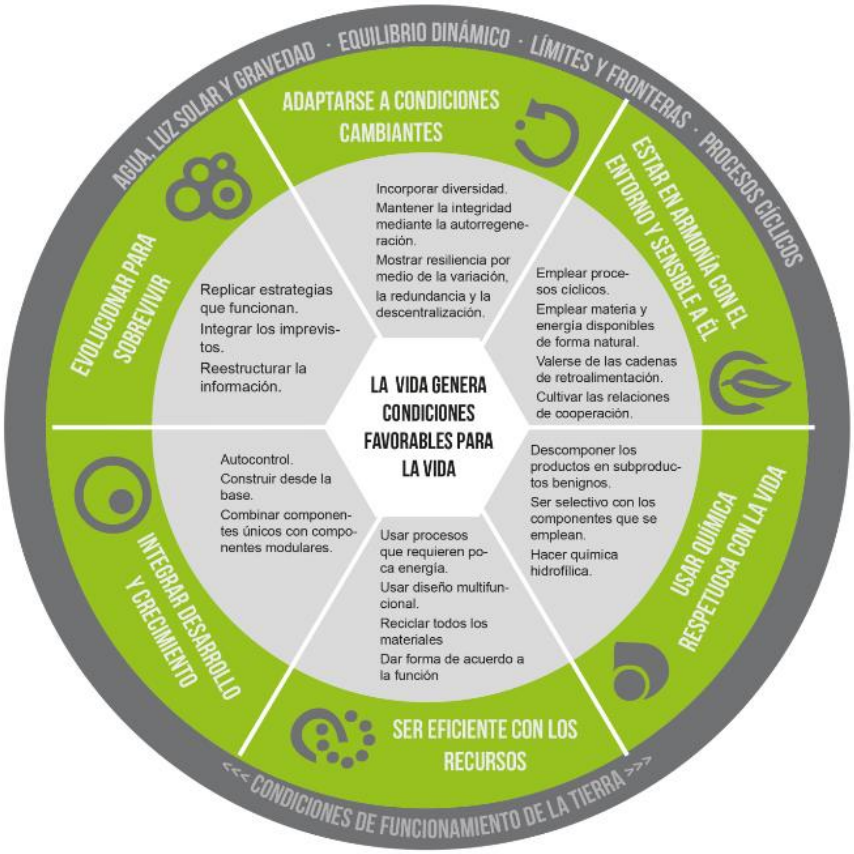
5.1 Marco Teórico

5.1.1 Biomimetismo en la Construcción

El concepto de biomimetismo se define como la ciencia y el arte de emular modelos, sistemas y procesos de la naturaleza para resolver problemas humanos de manera sostenible. (Benyus, 1997). En el ámbito de la ingeniería civil y la construcción, este concepto brinda alternativas que incrementan la eficiencia energética, maximizan la utilización de materiales y extienden la durabilidad de las obras civiles, favoreciendo de esta manera la sostenibilidad del entorno construido (Jamei & Vrcelj, 2021).

Figura 12

Principios biomiméticos



Nota. Adaptado de *Los Principios de la Vida* [Fotografía], por Guvial, 2013, natureinspireus (https://natureinspireus.wordpress.com/2013/11/21/los-principios-de-la-vida/)

La aplicación de principios biomiméticos en el diseño de materiales y edificaciones puede abordarse en varios niveles:

- ✓ Nivel de organismo: Imitación de formas y estructuras.
- ✓ Nivel de comportamiento: Emulación de procesos naturales.
- ✓ Nivel de ecosistema: Adopción de principios funcionales de los ecosistemas.

Estos niveles permiten a los diseñadores desarrollar materiales y edificaciones que no solo replican la apariencia de la naturaleza, sino que también funcionan de manera similar, adaptándose y respondiendo a cambios ambientales. La Figura 12 ilustra cómo la vida genera condiciones favorables para la supervivencia mediante principios de adaptación, eficiencia y cooperación. Este enfoque sistémico puede aplicarse en la construcción para desarrollar edificaciones resilientes y sostenibles, alineadas con los principios de la naturaleza.

5.1.2 Sostenibilidad en la Construcción

En el campo de la construcción la sostenibilidad es esencial para disminuir el impacto ambiental y asegurar el uso responsable de los recursos naturales, especialmente en un contexto en el que la demanda de edificaciones se incrementa de manera constante. La construcción sostenible se centra en aplicar principios de eficacia en el uso de materiales, energía y agua durante todas las etapas del ciclo de vida de una edificación, desde su diseño inicial hasta su eventual deconstrucción. Este enfoque no solo busca minimizar los residuos y la contaminación, sino también optimizar el confort y la calidad de vida de los ocupantes (Guía de Materiales para la Construcción Sostenible, 2022).

Con el fin de alcanzar esta meta, resulta imperativo considerar criterios específicos que incluyen la disminución de emisiones, la reutilización de materiales y el empleo de técnicas constructivas que favorezcan la durabilidad y la eficiencia energética de las estructuras. Como se ilustra en la Figura 12, los beneficios de este enfoque abarcan desde la disminución de la contaminación y los residuos hasta la

promoción de un ambiente saludable para los habitantes, mejorando la calidad del aire interior y optimizando el consumo de agua y energía (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

Figura 13

Consideraciones mínimas de la construcción sostenible en un proyecto

Nota. Adaptado de *Negocios Sostenibles,* por Concejo Colombiano de Construcción Sostenible, 2019, CCCS.

En la práctica, la sostenibilidad en la construcción requiere una evaluación minuciosa del impacto ambiental de los materiales utilizados, seleccionando aquellos que sean reciclables o procedentes de fuentes sostenibles. Además, la adopción de sistemas constructivos eficaces posibilita que las construcciones mantengan un consumo energético reducido, lo cual contribuye tanto al entorno como a los costos operativos del proyecto. Este enfoque integral contribuye a un ciclo de vida más sostenible para las construcciones, conformando la construcción civil con los objetivos de desarrollo sostenible y las demandas actuales de protección ambiental (Cartilla Criterios Ambientales para el Diseño y Construcción de Vivienda Urbana, 2012).

5.1.3 Eficiencia Energética

Principalmente se caracteriza a la eficiencia energética por la capacidad de un edificio o sistema a la hora de consumir la menor cantidad de energía posible, manteniendo a la vez un nivel adecuado de funcionalidad y comodidad. En lo que respecta a la construcción, este término se refiere a establecer y administrar construcciones que disminuyan el consumo de energía durante su etapa de vida, desde la etapa de construcción hasta la ocupación y posible demolición. La finalidad de disminuir la demanda energética en sistemas de calefacción, ventilación, aire acondicionado e iluminación se fundamenta en la disminución de la dependencia de recursos no renovables y la disminución de la fuga de gases de efecto invernadero (Cowen et al., 2021).

Para alcanzar edificios energéticamente eficaces, se presentan diversas estrategias que desde el diseño pasivo, que minimiza la luz natural y la ventilación, hasta el uso de sistemas constructivos avanzados y materiales de alta calidad térmica. Estas estrategias contribuyen a disminuir la pérdida de calor en invierno y a disminuir la ganancia térmica en verano, lo que posibilita una temperatura interior confortable sin depender exclusivamente de sistemas mecánicos de climatización (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

5.1.4 Durabilidad y Vida Útil en Materiales y Estructuras

En el ámbito de la construcción sostenible la durabilidad y vida útil de los materiales y estructuras son aspectos críticos en la ingeniería civil, donde se busca maximizar el desempeño de los materiales mientras se minimiza su impacto ambiental. La durabilidad alude a la capacidad de un material o estructura de soportar los impactos ambientales y las cargas a través del tiempo, preservando sus características funcionales sin la necesidad de sustituir o mantener los mantenimientos habituales (Criterios Ambientales para el Diseño y Construcción de Vivienda Urbana, 2012). Por otra parte, la vida útil alude al lapso en el que un material o estructura satisface los requisitos de funcionalidad y seguridad para los que se creó, antes de requerir intervenciones significativas o reemplazos (Borsani, 2011).

La durabilidad y la vida útil se determinan por factores ambientales, tales como la exposición a la humedad, la radiación UV y los contaminantes atmosféricos, los cuales aceleran el desgaste y degradación de los materiales. Por consiguiente, la elección de materiales resistentes y resistentes a condiciones climáticas particulares resulta esencial para disminuir la frecuencia de mantenimiento y los costos asociados. En Colombia, la diversidad climática implica que los materiales deben adaptarse a diversas condiciones de temperatura y humedad, factores que pueden afectar su desempeño estructural si no se consideran adecuadamente (Guía de Materiales para la Construcción Sostenible, 2022).

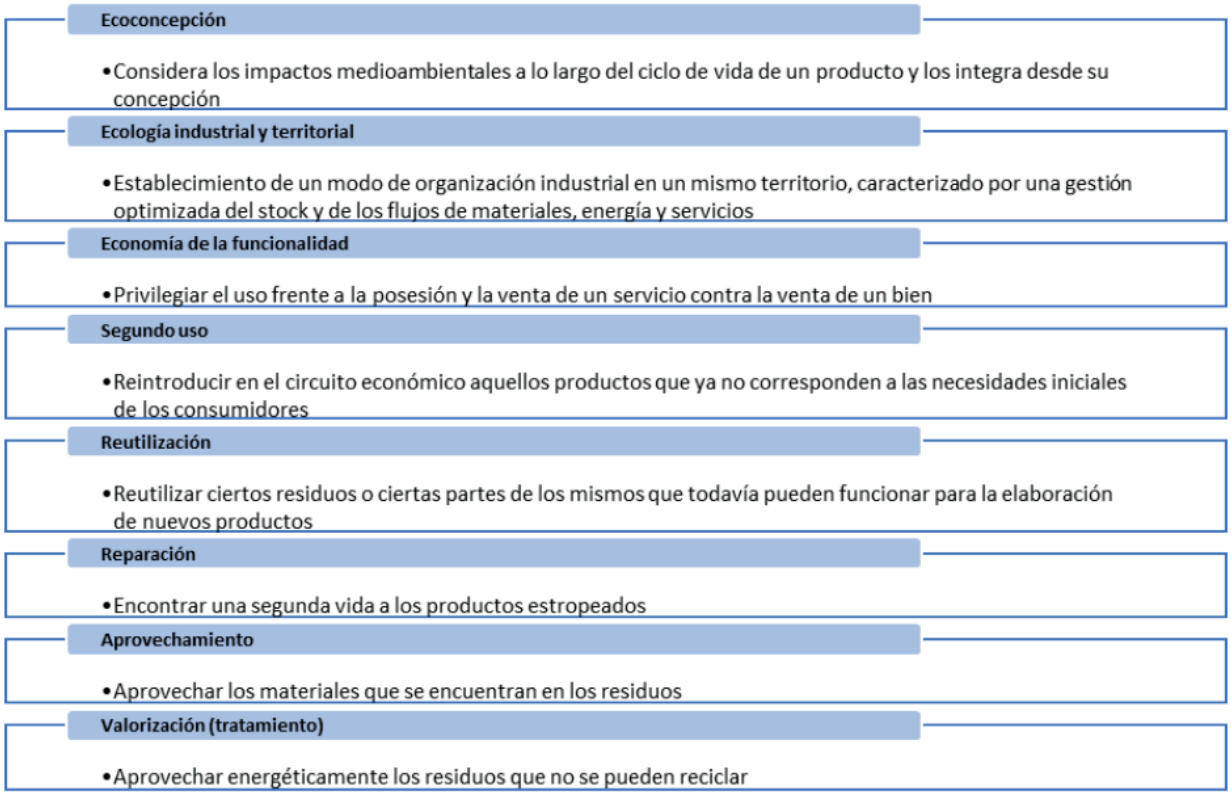
5.1.5 Reducción de Residuos y Economía Circular

Promover la sostenibilidad en la construcción es crucial mediante la reducción de residuos y la adopción de la economía circular, dado que este sector es uno de los principales generadores de desechos y consumidores de recursos naturales.

Reducir estos residuos implica disminuir la producción de desechos en todas las fases de un proyecto, desde el diseño hasta la construcción y demolición, promoviendo el uso de materiales reutilizables o reciclables y adoptando medidas que mejoren la gestión de recursos (Guía de Materiales para la Construcción Sostenible, 2022). La economía circular se enfoca en convertir residuos en recursos para nuevas actividades productivas, impulsando un sistema regenerativo en el que los materiales descartados, ya sea orgánicos o tecnológicos, vuelven al ciclo productivo como materias primas (Braungart & McDonough, 2002).

Figura 14

Principios de la economía circular



Nota. Adaptado de *CONPES 3874,* por Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos, 2016, Min Ambiente.

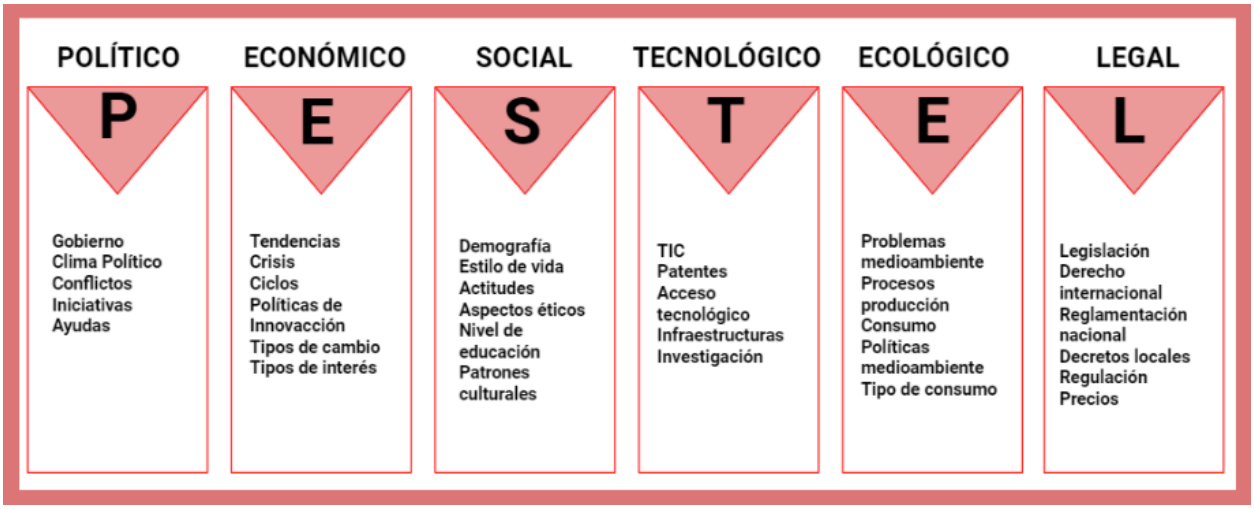
La integración de estos principios en la construcción permite diseñar estructuras que simplifiquen el desmontaje y la reutilización de componentes al final de su vida útil, lo que contribuye a una economía circular en la que los materiales son reutilizados, reciclados o valorizados energéticamente, como se muestra en la Figura 14. La optimización del uso de recursos y disminución del impacto ambiental, a fin de cerrar el ciclo de vida de los materiales y fomentar una gestión sostenible que reduce los volúmenes de residuos y preserva los recursos naturales (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

5.1.6 Análisis PESTEL

Se trata de una herramienta que posibilita la evaluación de los factores externos que afectan a una organización o proyecto, brindando una comprensión detallada de las oportunidades y amenazas en el entorno en el que se desarrolla. Este análisis comprende seis dimensiones: La política, económica, social, tecnológica, ecológica y legal brinda la oportunidad de investigar cambios externos, detectar riesgos y adoptar decisiones estratégicas a fondo (Lull Noguera & Galdón Salvador, 2022)

Figura 15

Elementos en el análisis PESTEL



Nota. Adaptado de *Qué es el análisis PESTEL y cómo hacerlo factores y ejemplos,* por EBAC, 2023, (https://images.app.goo.gl/3bbwgJJcJdiKNYgy7).

Estos factores interactúan y afectan la viabilidad de proyectos innovadores como la introducción del biomimetismo en la construcción, de modo que este análisis posibilita la adaptación de las estrategias para responder de forma activa a las tendencias y limitaciones del entorno.

5.1.7 Análisis DOFA

Este tipo de análisis es una herramienta de diagnóstico ampliamente utilizada para evaluar los factores internos y externos que pueden influir en el desarrollo de un proyecto. Este método permite

identificar y categorizar los aspectos positivos y negativos del entorno y del proyecto, proporcionando una estructura clara para la toma de decisiones y la planificación de estrategias (López, 2011).

Figura 15

Componentes de la matriz DOFA

Nota. Adaptado de *¿Cómo hacer un análisis DOFA?,* por Sistema TDC, s.f, (https://images.app.goo.gl/eG8paEmZ57BVUFxZ6).

La matriz DOFA estructura estos componentes en cuatro cuadrantes: fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas, facilitando a los equipos de trabajo la visualización de cómo los elementos internos, tales como las habilidades y restricciones de la organización, se relacionan con el ambiente donde se desarrollan sus operaciones.

Por lo que, el análisis DOFA podrá reconocer los desafíos y oportunidades en la adopción de biomimetismo en la construcción colombiana, sino que también facilita la formulación de estrategias específicas para superar las barreras y potenciar los factores que contribuyen al cumplimiento de los objetivos propuestos.

5.2 Marco Legal

En Colombia, en el ámbito de la construcción sostenible y la aplicación de principios de biomimetismo, es fundamental considerar las regulaciones y normativas que guían y apoyan estas prácticas. La regulación vigente establece pautas para el uso eficiente de recursos, la reducción de emisiones, la gestión de residuos y la sostenibilidad ambiental, elementos fundamentales para asegurar que los proyectos de construcción cumplan no solo con los estándares de calidad, sino también contribuyan a la protección del entorno. Se presenta a continuación una lista organizada de las leyes, políticas destacadas a nivel nacional e internacional relacionadas con la sostenibilidad en la construcción, ofreciendo una visión global de las normativas clave para guiar la creación de edificaciones inspiradas en la naturaleza.

Tabla 1

Normatividad vigente nacional e internacional

Normatividad	Función
Política Nacional de Edificaciones Sostenibles (CONPES 3919 de 2018):	Esta política busca impulsar la inclusión de criterios de sostenibilidad en todas las etapas del ciclo de vida de las edificaciones, mediante ajustes normativos, mecanismos de seguimiento y promoción de incentivos económicos.
Decreto 1285 de 2015	Establece lineamientos de construcción sostenible para edificaciones, orientados al mejoramiento de la calidad de vida y al ejercicio de actuaciones con responsabilidad ambiental y social.
Resolución 0019 de 2022	Define parámetros y lineamientos de construcción sostenible para edificaciones nuevas en el país, con el objetivo de alcanzar metas mínimas de reducción en consumos de agua y energía.
NTC 6112 de 2016	Establece criterios para el Sello Ambiental Colombiano, aplicable a edificaciones sostenibles de uso diferente a vivienda, abarcando las etapas de diseño, construcción, uso y aprovechamiento final de las edificaciones.

Normatividad	Función
Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos (CONPES 3874 de 2016)	Establece lineamientos para el manejo adecuado de los residuos sólidos en el país. Su objetivo principal es promover la transición de un modelo lineal de producción y consumo hacia una economía circular, donde se prioriza la reducción, reutilización y reciclaje de materiales, minimizando la disposición final de residuos.
Estrategia Nacional de Economía Circular (ENEC)	Busca transformar el modelo económico tradicional hacia uno más sostenible y eficiente en el uso de recursos. Esta estrategia promueve la reutilización, reciclaje y aprovechamiento de materiales, agua y energía, con el objetivo de reducir la generación de residuos y minimizar el impacto ambiental.
Resolución 0549 de 2015	Establece parámetros y lineamientos para la construcción sostenible en el país. Su objetivo principal es promover prácticas que reduzcan el consumo de agua y energía en las nuevas edificaciones, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental y al mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes.
Ley 1083 de 2006	Introduce normas sobre planeación urbana sostenible, enfocándose en la movilidad sostenible y la eficiencia energética en edificaciones públicas. Promueve la adopción de prácticas que reduzcan el impacto ambiental en las ciudades.
Objetivo de Desarrollo Sostenible 11 (ODS 11)	Las Naciones Unidas promueve este objetivo para lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles. Se reconoce la creciente urbanización global y la necesidad de abordar los desafíos asociados para garantizar un desarrollo urbano equitativo y sostenible.
Objetivo de Desarrollo Sostenible 9 (ODS 9)	Las Naciones Unidas promueve este objetivo para construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible, y fomentar la innovación. Se reconoce la importancia de la infraestructura, la industrialización y la innovación como motores clave para el desarrollo económico y el bienestar humano.
LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)	Es un sistema de certificación internacional que evalúa y reconoce edificaciones sostenibles y eficientes en el uso de recursos. Desarrollado por el U.S. Green Building Council (USGBC), LEED promueve prácticas de construcción que minimizan el impacto ambiental y mejoran la calidad de vida de los ocupantes.

Normatividad	Función
EDGE (Excellence in Design for Greater Efficiencies)	Es un sistema internacional de certificación de construcción sostenible desarrollado por la Corporación Financiera Internacional (IFC), miembro del Grupo Banco Mundial. Su objetivo es promover edificaciones más eficientes en el uso de recursos, especialmente en tres áreas: energía, agua y materiales.
CASA Colombia	Es un sistema de certificación desarrollado por el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS) que reconoce proyectos de vivienda sostenibles y saludables en el país. Este sistema se centra en el usuario y promueve la sostenibilidad integral, evaluando diversos aspectos del diseño y construcción de viviendas

Nota. Fuente: Elaboración propia.

6. Metodología

6.1 Diseño de la Investigación

6.1.1 Tipo de Investigación

Este proyecto sigue un enfoque descriptivo-analítico y es de naturaleza cualitativa, basado en la revisión de literatura y el análisis estratégico. También se considerarán aspectos cuantitativos en el análisis de métricas de durabilidad, eficiencia energética y reducción de residuos.

Por otro lado, se aplicará un enfoque deductivo comenzando con la revisión de estudios a nivel global y local para así lograr identificar patrones y tendencias en el uso del biomimetismo en construcción, posteriormente se hará un análisis específico para proponer estrategias operativas y técnicas adecuadas a las características, retos y oportunidades de la industria colombiana.

6.2 Recolección de Datos

6.2.1 Revisión Bibliográfica Sistemática

Para el primer objetivo, se llevó a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva y sistemática de estudios y casos de aplicación del biomimetismo en construcción a nivel global.

Criterios de Selección. Se incluirán estudios sobre materiales de construcción y diseño de edificios que tengan un enfoque biomimético y evalúen la durabilidad, eficiencia energética y reducción de residuos.

Fuentes. Se utilizarán bases de datos científicas (como Scopus, ScienceDirect, Google Scholar, etc.) y literatura gris para obtener información relevante.

6.2.3 Modelos de Análisis Estratégico

Para el desarrollo del segundo objetivo, se recopilará información sobre los aspectos políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ambientales y legales con el fin de identificar los factores externos que ayuden a encontrar amenazas y oportunidades, posteriormente se identificaran los factores internos

que ayuden a encontrar las fortalezas y debilidades en la implementación del biomimetismo en la industria colombiana.

6.3 Análisis de Datos

6.3.1Evaluación de Durabilidad, Eficiencia Energética y Reducción de Residuos

Matrices de información. Se construirán matrices para compilar los factores de durabilidad, eficiencia energética y reducción de residuos encontrados en los estudios revisados.

Criterios de Evaluación. Se definirán parámetros cualitativos y cuantitativos a partir de la literatura (como índices de durabilidad, coeficientes de eficiencia energética, métricas de residuos, etc.).

6.3.2 Análisis PESTEL y DOFA

PESTEL. Se analizarán diferentes aspectos a nivel externo que pueden afectar la implementación del biomimetismo en Colombia.

DOFA. Se identificarán las fortalezas y debilidades a nivel interno del biomimetismo para la construcción colombiana.

6.3.3 Recomendaciones

A partir del análisis PESTEL y DOFA, y considerando la revisión bibliográfica, se desarrollarán recomendaciones específicas para la adaptación del biomimetismo en el contexto colombiano.

Estrategias Técnicas y Operativas. Basadas en los hallazgos, se formularán estrategias para el uso de materiales y diseños biomiméticos, enfatizando en su aplicabilidad y viabilidad en Colombia.

6.4 Elaboración del Documento Final

Se estructurará el documento que presente los hallazgos de manera lógica y ordenada, con gráficos, matrices y tablas que resuman la información clave y se expondrán conclusiones detalladas sobre cómo el biomimetismo puede contribuir a mejorar la sostenibilidad y eficiencia en la construcción colombiana, junto con recomendaciones específicas para su implementación.

7. Resultados y Análisis

7.1 Análisis literario

Para esta investigación, se llevó a cabo un exhaustivo análisis literario enfocado en el biomimetismo aplicado a la construcción, con el fin de identificar y comprender el impacto de este enfoque en la sostenibilidad del sector. Inicialmente, se realizó una búsqueda de 28 documentos relevantes, seleccionados específicamente por su relación con el uso del biomimetismo en materiales usados en la construccion y diseño de edificaciones, esta busqueda se llevo a cabo con documentos encontrados en bases de datos académicas como Google Scholar, Scopus, Researchgate, entre otras. Cada documento fue revisado minuciosamente para analizar su enfoque biomimético, detallando cómo las soluciones bioinspiradas propuestas en cada estudio pueden aplicarse en el contexto de la construcción sostenible.

En el análisis, se incluyó una breve explicación del funcionamiento de las soluciones biomiméticas presentadas en cada investigación y se examinaron los resultados obtenidos, lo cual permitió observar el impacto de estas soluciones en términos de eficiencia, adaptabilidad y rendimiento. Adicionalmente, cada estudio fue clasificado según el concepto de sostenibilidad que abordaba, ya fuera en términos de durabilidad, eficiencia energética o reducción de residuos, permitiendo así una organización clara y detallada de los aportes de cada documento en función de los objetivos sostenibles de esta investigación.

Finalmente, el análisis también incluyó una evaluación de las aplicaciones constructivas que podrían derivarse de cada investigación, considerando el potencial de implementación en el contexto colombiano. Este enfoque permitió no solo entender el alcance de cada propuesta bioinspirada, sino también visualizar posibles aplicaciones prácticas en el sector de la construcción, facilitando así el desarrollo de recomendaciones estratégicas alineadas con las necesidades de sostenibilidad del país.

A continuación, en la figura 16 se observa la composición de la matriz enfocada a materiales, se encontraron 12 documentos relacionados al uso del biomimetismo en materiales.

Figura 16

Matriz de análisis literario en materiales biomiméticos

1. MATRIZ ENFOCADA A MATERIALES					
Id	Nombre del proyecto	Enfoque biomimetico	Funcionamiento y resultados	Concepto sostenible	Aplicaciones constructivas
1	Hormigón autorreparable con bacterias y reforzado con fibras naturales: principios y aplicaciones en Ecuador. (Sierra et al., 2016).	Las bacterias, específicamente la Bacillus pseudofirmus que prosperan en ambientes alcalinos forman esporas y pueden sobrevivir durante años sin alimento ni oxígeno.	El concreto autorreparable utiliza bacterias encapsuladas que permanecen inactivas dentro de la mezcla de hormigón hasta que se producen grietas. Cuando el agua ingresa a estas fisuras, las bacterias se activan y comienzan a metabolizar una fuente de alimento previamente añadida, como el lactato de calcio. Este proceso genera carbonato de calcio (CaCO3), que se deposita en las grietas y las sella. De esta manera, se restaura la integridad del material, evitando que agentes dañinos como agua, oxígeno o cloruros penetren y aceleren la degradación del concreto y el acero de refuerzo. Esto extiende la vida útil de las estructuras y reduce la necesidad de reparaciones frecuentes.	Durabilidad	Canales, puentes, túneles y construcciones expuestas a ambientes agresivos.
2	Influencia de las piedras fotoluminiscentes en la iluminación y las propiedades mecánicas del concreto (Medina & Moreno, 2018)	El fenómeno de la bioluminiscencia se encuentra en organismos como los peces abisales o ciertos insectos, como las luciérnagas. Estos seres vivos generan luz de forma natural sin necesidad de energía externa, utilizando reacciones químicas dentro de sus cuerpos.	Las piedras fotoluminiscentes se incorporan en la capa superficial del concreto y están compuestas principalmente de aluminato de estroncio, un material capaz de absorber luz solar o artificial durante el día y emitirla de manera gradual durante la noche. Este proceso no requiere de una fuente de energía eléctrica, ya que se basa en la captura y almacenamiento de energía luminosa que, posteriormente, se libera lentamente en forma de luz visible. Los estudios experimentales demuestran que la incorporación de estas piedras no compromete las propiedades mecánicas del concreto, como la resistencia a la compresión y la flexión. Por lo tanto, el concreto fotoluminiscente mantiene su funcionalidad estructural, a la vez que proporciona un valor agregado al iluminar el entorno de manera eficiente y sostenible.	Eficiencia energetica	Pavimentos, ciclovias, areas recretivas y fachadas de edificios.
3	Enfoque biomimético aplicado al diseño de una vivienda unifamiliar en Portoviejo (Roldán, Vanga & Ortega, 2023)	Se basa en la incorporacion de la Guadua Angustifolia Kunth como material estructural, inspirado en la flexibilidad y resistencia de las plantas naturales. Este tipo de bambú ha demostrado tener propiedades físico-mecánicas adecuadas para soportar cargas estructurales	En términos de resistencia estructural, la Guadua posee una densidad que varía entre 700 y 900 kg/m^3, y su contenido de humedad óptimo para la construcción es de aproximadamente 16%. Para el diseño en Portoviejo, se adoptaron valores de esfuerzo admisible que aseguran la estabilidad de la estructura. Por ejemplo, su resistencia a la flexión se estima en 12,45 MPa, mientras que su resistencia a la compresión es de 11,62 MPa. Estas propiedades permiten a la Guadua ser utilizada como columna, viga, y otros elementos de soporte. Adicinalmente su flexibilidad natural le permite absorber energía en zonas sísmicas, lo que aumenta la durabilidad y la resistencia de la estructura frente a movimientos sísmicos y tambien es un material renovable y biodegradable, lo que contribuye a una menor generación de residuos en comparación con materiales convencionales como el acero o el concreto.	Durabilidad y reduccion de residuos	Estructuras en edificaciones sostenibles.
5	Biomimetismo en la construcción: ladrillos de adobe estabilizados con glicoproteínas para una mayor resistencia a la compresión inspirados en los montículos de termitas (Balila & Vahdati, 2024)	La estabilización de ladrillos de adobe se basa en la imitación del comportamiento de las termitas al construir sus montículos ya que estas utilizan una glicoproteína presente en su saliva para unir las partículas del suelo, lo que les permite construir estructuras altamente resistentes y duraderas.	El estudio evaluó la resistencia a la compresión de ladrillos de adobe estabilizados con diferentes concentraciones de glicoproteínas y los comparó con ladrillos de adobe sin estabilización. Se analizó el efecto de diferentes concentraciones de glicoproteínas en la resistencia a la compresión y durabilidad de los ladrillos de adobe. La glicoproteína más efectiva fue la BSA, que a una concentración del 0.5% aumentó la resistencia a la compresión en un 41% en los ladrillos de Sudán y un 17% en los ladrillos del Reino Unido. A concentraciones más altas, como el 5%, la resistencia mejoró significativamente, con incrementos del 203% en los ladrillos británicos y del 97% en los sudaneses. Además de mejorar la resistencia a la compresión, estos ladrillos estabilizados con BSA mostraron una mayor durabilidad, superando incluso a ladrillos estabilizados con cemento y cal. Esto indica que los ladrillos tratados con BSA tienen una resistencia comparable a los bloques de hormigón utilizados en construcciones convencionales. Además, el uso de glicoproteínas provenientes de desechos industriales fomenta un enfoque sostenible y de economía circular, contribuyendo a la reducción del impacto ambiental.	Durabilidad y reduccion de residuos	Muros internos en edificaciones
7	Materiales fotocatalíticos y sus aplicaciones en construcción (Garcia & Espiga, 2016).	Los materiales fotocatalíticos se inspiran en procesos naturales de oxidación avanzada, imitando cómo la luz solar provoca reacciones químicas en la naturaleza. En particular, se utiliza el dióxido de titanio (TIO2), que actúa de manera similar a las reacciones que ocurren en la naturaleza cuando la luz UV desencadena procesos de limpieza ambiental.	La investigación demuestra que los materiales fotocatalíticos, como el TiO2, cuando se exponen a la luz solar o a una fuente de luz UV, activan una reacción química que genera radicales libres (hidroxilos y superóxidos). Estos radicales son altamente reactivos y oxidan compuestos contaminantes presentes en el aire, como óxidos de nitrógeno (NOx), óxidos de azufre (SOx) y compuestos orgánicos volátiles. Los resultados de las pruebas en campo han demostrado que estos materiales pueden reducir hasta un 70% de las emisiones de NOx en áreas urbanas, contribuyendo significativamente a la mejora de la calidad del aire.Los materiales fotocatalíticos también tienen propiedades autolimpiantes, lo que reduce la acumulación de suciedad y la necesidad de mantenimiento. Este aspecto mejora la durabilidad de las fachadas y reduce la cantidad de residuos generados por la limpieza y el mantenimiento rutinario de las edificaciones, lo que a su vez disminuye el uso de productos químicos agresivos.	Durabilidad y reduccion de residuos	Fachadas, pavimentos y superficies expuestas al aire libre
8	Aprovechamiento sostenible de residuos poliméricos como agregados del concreto: una revisión (Molina et al., 2021)	Se basa en la imitación de los ciclos naturales cerrados, donde los residuos generados en un proceso se reutilizan como insumos en otro.	El estudio demuestra que la incorporación de residuos poliméricos en el concreto reduce significativamente el uso de materias primas tradicionales y el volumen de residuos que terminan en vertederos. Al sustituir los agregados convencionales con residuos plásticos, se observa una reducción en el peso del concreto debido a la ligereza de los polímeros, y se mejoran las propiedades de aislamiento térmico y eléctrico. Sin embargo, se encuentra que existe una disminución en la resistencia a la compresión a medida que aumenta el porcentaje de residuos plásticos, lo que implica que estos materiales son más adecuados para aplicaciones no estructurales. En términos de sostenibilidad, se logra una gestión eficiente de los residuos, reduciendo su impacto ambiental y promoviendo un ciclo de vida más circular.	Reduccion de residuos	Solados de limpieza, senderos y acabado de suelos.
9	Evaluación de las propiedades mecánicas de ladrillos elaborados con residuos de vidrio y plástico. Análisis de las emisiones de dióxido de carbono (Howard et al., 2021)	La fabricación de ladrillos sostenibles se inspira en la estructura en capas de los caparazones de moluscos, que combinan minerales y proteínas para lograr alta resistencia mecánica y capacidad de absorción de impactos.	El estudio evaluó la fabricación de ladrillos utilizando diferentes proporciones de residuos plásticos (PET) y vidrio. Los resultados demostraron que, al aumentar el contenido de vidrio y agregados en la mezcla, los ladrillos exhiben mejoras tanto en densidad como en resistencia a la compresión. Los ladrillos con mayor contenido de vidrio presentaron un aumento en la resistencia a la compresión de hasta un 243% en comparación con las muestras que solo contenían plástico. Además, el análisis de la huella de carbono mostró que el uso de estos residuos en la producción de ladrillos redujo las emisiones de dióxido de carbono en un 30% en comparación con los ladrillos tradicionales. Este proceso también es más eficiente en términos energéticos, ya que se realiza a una temperatura de cocción más baja, lo que disminuye el consumo de energía y las emisiones asociadas.	Reduccion de residuos	Muros de relleno
11	Biomimesis espacial: Análisis de la planta Totora y su vinculación con la arquitectura (Rivera, 2023)	Se basa en la totora, una planta acuática con propiedades naturales que la hacen ideal para la construcción sostenible. La estructura de la totora, que cuenta con cámaras de aire internas, ofrece un excelente aislamiento térmico y es un material extremadamente ligero.	La investigación demostró que la totora es un material altamente eficiente desde el punto de vista energético debido a sus propiedades aislantes. Se han utilizado paneles de totora en cubiertas y fachadas, lo que permite una reducción significativa en la necesidad de sistemas de calefacción y refrigeración gracias a su capacidad para mantener temperaturas más estables dentro de los edificios. Además, la totora es un recurso renovable que puede cosecharse de manera sostenible cada seis meses, lo que contribuye a la reducción de residuos en la construcción. El uso de la totora en lugar de materiales no renovables como el concreto o el acero disminuye el impacto ambiental y promueve el uso de recursos locales	Eficiencia energetica y reduccion de residuos	Cubiertas, fachadas y aislamientos de muros
12	Generación de un material compuesto biomimético usando simulaciones computacionales con el método de los elementos finitos (Colli, I. D. G. C. 2022)	Se utiliza el biomimetismo para crear un material compuesto inspirado en la estructura jerárquica del nácar, un material biológico presente en las conchas de algunos moluscos. Esta estructura consiste en un 95% de plaquetas poligonales hechas de aragonita, unidas por un 5% de biopolímero. Las plaquetas tienen una disposición en forma de ladrillo y mortero, lo que le confiere al nácar una alta tenacidad y resistencia.	El material compuesto biomimético desarrollado en esta investigación se basa en la imitación de la estructura jerárquica del nácar, utilizando aluminio AA7075-T651 para replicar las plaquetas rígidas y resina epóxica (Araldite o Betamate) como sustituto del biopolímero que une las capas. Las simulaciones realizadas mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM) evaluaron el comportamiento del material en pruebas de flexión y de impacto. Los resultados indicaron que las vigas biomiméticas con capas onduladas continuas (VB1) soportaron mayores cargas a partir de 7 mm de desplazamiento en flexión y lograron una mejor absorción de energía en impacto, reduciendo en un 66% la velocidad del impacto en comparación con una viga monolítica. Estos avances no solo demuestran que este diseño biomimético mejora la resistencia y la absorción de energía, sino que también contribuye significativamente a la durabilidad de las obras	Durabilidad	Esstructuras portantes y fachadas
16	Compuestos cementicios estructurados tipo nácar, resistentes y dúctiles. Gupta, S., Esmaeeli, H. S., & Moini, R. (2024)	El nacar es un material biológico que se encuentra en las conchas de moluscos, particularmente en los recubrimientos internos de estas conchas. El nácar está compuesto por tabletas de aragonito (un mineral extremadamente frágil) dispuestas en un patrón jerárquico conocido como "ladrillo y mortero". Estas tabletas están unidas por una matriz orgánica biopolimérica suave y flexible. Esta disposición estructural le otorga al nácar una combinación excepcional de dureza y ductilidad, permitiéndole resistir fracturas a pesar de estar formado por componentes frágiles.	Este proyecto desarrolla un compuesto cementicio inspirado en el nácar mediante la creación de capas de tabletas hexagonales de cemento, separadas y/o ranuradas, con intercalados de elastómeros (Polivinil Siloxano). Estas capas permiten que las tabletas se deslicen entre sí cuando se aplican fuerzas, promoviendo la deformación sin fallos catastróficos. En las pruebas de resistencia, se observó que las propiedades mecánicas, como la resistencia a la fractura, se incrementaron 17 veces (con un valor de 73.68 MPa·mm^1/2 en el compuesto "separado") respecto al cemento estándar, y la ductilidad se incrementó 19 veces. Estos mecanismos permiten distribuir mejor el daño y absorber grandes cantidades de energía antes del fallo, resultando en materiales más resistentes y dúctiles.	Durabilidad	Estrcuturas de edificaciones
17	Desarrollo de biomaterial a base de micelio y residuos madereros para el campo de la construcción. Alzate Restrepo, J. (2023)	El micelio es la estructura vegetativa de los hongos que descompone los compuestos lignocelulósicos, presentes en materiales como la madera, mediante enzimas que excreta a través de las hifas (filamentos del micelio). Este proceso imita la descomposición natural de materiales orgánicos en los ecosistemas, y en el estudio se usa específicamente la especie Pleurotus ostreatus que crece en residuos madereros, aprovechando los nutrientes presentes para formar un material cohesivo.	El biomaterial se desarrolla a partir del cultivo del micelio en residuos madereros. El proceso comienza con la inoculación del hongo en el sustrato maderero, seguido de su colonización bajo condiciones ambientales controladas. Luego, el micelio aglutina las partículas del sustrato formando un material ligero. Las muestras se sometieron a pruebas de resistencia a compresión y conductividad térmica, obteniendo un valor de conductividad térmica de 0.082 W/mK y un coeficiente de absorción acústica de 0.90 para frecuencias entre 250-2000 Hz. Esto lo hace un material competitivo para aplicaciones termoacústicas.	Eficiencia energetica y Gestion de residuos	Paneles de aislamiento acústico y térmico en las edificaciones
23	El estándar biodigital: Ladrillos de arcilla impresos en 3D, elásticos y duraderos. Estévez, A. T., & Abdallah, Y. K. (2022).	El estudio utiliza principios biomiméticos inspirados en la naturaleza al implementar algoritmos de reacción-difusión y la ruta más corta, simulando la absorción de agua en un volumen de arcilla. Este enfoque refleja cómo los organismos naturales optimizan sus formas para distribuir recursos, minimizando material y maximizando eficiencia. Además, la distribución de los caminos más cortos en los ladrillos sigue un patrón morfogenético, garantizando una estructura resistente con el mínimo consumo de material.	Los ladrillos de arcilla biodigital impresos en 3D (3DPBDCB) se diseñan para combinar elasticidad y durabilidad mediante geometrías específicas. Se probaron tres modelos (V1, V2, V3) en variantes lineales y de masa, destacando el modelo lineal V3 por su elasticidad antes y después del agrietamiento, soportando fuerzas de 150 N pre-agrietamiento y 200 N post-agrietamiento. En términos de resistencia a la compresión, el modelo lineal V1 resistió hasta 240 N, superando a los ladrillos industriales. Estos ladrillos aprovechan su diseño geométrico optimizado, lo que permite una distribución eficiente de tensiones, haciéndolos adecuados para aplicaciones estructurales, como construcciones resistentes a terremotos.	Durabilidad y eficiencia energetica	Fachadas y muros estructurales

Nota. La figura presentada hace referencia a la matriz encontrada en el **Anexo A.** Fuente: Elaboración propia.

También, en la figura 17 se evidencia la composición de la matriz enfocada a al diseño de edificaciones, se encontraron 16 documentos relacionados al diseño biomimético en las construcciones.

Figura 17

Matriz de análisis literario en diseño de edificaciones biomiméticas

2. MATRIZ ENFOCADA AL DISEÑO DE EDIFICACIONES					
Id	Nombre del proyecto	Enfoque biomimetico	Funcionamiento y resultados	Concepto sostenible	Aplicaciones constructivas
3	Enfoque biomimético aplicado al diseño de una vivienda unifamiliar en Portovejo (Roldán, Vanga, & Ortega, 2023)	Se basa en la estructura del nido de termitas para resolver problemas de confort térmico y ventilación natural. Los nidos de termitas, construidos para albergar a millones de insectos, logran regular eficazmente la temperatura interna mediante sistemas de ventilación pasivos que permiten refrescar el aire caliente y conservar el aire fresco	La investigación implementa principios de ventilación natural inspirados en los nidos de termitas para mejorar el confort térmico de la vivienda. La orientación y el sistema de ventilación pasiva ayudan a refrescar el interior sin la necesidad de aire acondicionado, aprovechando los vientos predominantes y reduciendo la dependencia de sistemas de climatización. Los resultados indican que esta estrategia puede mantener temperaturas frescas en el interior de la vivienda incluso en condiciones de calor extremo, optimizando la eficiencia energética y reduciendo el consumo energético hasta en un 30% en comparación con viviendas convencionales en la misma región.	Eficiencia energetica	Edificaciones sostenibles y sistemas de climatizacion en viviendas
4	Mejora de la eficiencia energética en fachadas de vidrio mediante estrategias de diseño biomimético (Büyra, Günes & Semra, 2024)	Se basa en principios naturales de termorregulación como la Fenestraria aurantiaca, una planta que controla la luz solar al capturarla y refractarla. Asimismo, se tomó como modelo el pasto gigante, que se cierra a bajas temperaturas para proteger sus hojas internas. Además, se adoptó el patrón Voronoi, basado en estructuras naturales, para regular la distribución de la luz solar y el calor.	El diseño de la Fachada biomimética integra dos tecnologías principales: vidrio electrocrómico y un sistema neumático de ETFE. El vidrio electrocrómico cambia sus propiedades según la intensidad de la luz solar, reflejando el exceso de luz durante el día y funcionando como un aislante térmico durante la noche. Por otro lado, el sistema neumático se activa a bajas temperaturas, creando una segunda capa que protege el interior del frío. Los resultados de las simulaciones energéticas aplicadas a la fachada del baño Süleyman Pasha mostraron que, con el uso de vidrio electrocrómico de doble capa y revestimiento reflectante, se logró una reducción del 32% en el consumo energético total, en comparación con la fachada original. Esto se trabajo en una disminución significativa de las cargas de calefacción y refrigeración, mejorando la eficiencia energética del edificio y aumentando el confort interior.	Eficiencia energetica	Fachadas de edificios
6	Las fachadas de edificios biomiméticos demuestran potencial para reducir el consumo de energía para diferentes tipologías de edificios en diferentes zonas climáticas (Webb, 2021).	Se inspira en adaptaciones biológicas de los mamíferos homeotérmicos, particularmente en el pelaje animal y el proceso de perfusión sanguínea. Estas características naturales sirven para regular la temperatura corporal y proporcionar aislamiento térmico en climas diversos.	El funcionamiento del diseño biomimético se basa en la simulación de una fachada que integra las características de aislamiento de una capa de pelaje y un sistema de perfusión de fluido. En la simulación, esta fachada fue comparada con una fachada convencional en diferentes zonas climáticas: templado oceánico, desierto cálido, sabana tropical y clima continental húmedo. Los resultados mostraron que el diseño biomimético redujo significativamente el consumo energético en todas las zonas climáticas, destacándose una reducción del 55.4% en climas tropicales y del 55.1% en climas continentales húmedos. La simulación también evaluó diferentes tipologías de edificios (oficinas, escuelas y centros de atención para ancianos), demostrando una reducción del 67.1% en el consumo de energía en centros de atención, donde la demanda de calefacción es continua debido al funcionamiento 24 horas.	Eficiencia energetica	Fachadas de edificios
10	Estudio de muros aligerados con un diseño basado en la estructura de la concha nácar para aplicaciones en zonas sísmicas (Mena, 2021)	El diseño biomimético se basa en la estructura "brick-and-mortar" de la concha nácar, donde las placas minerales de aragonito actúan como ladrillos, y el adhesivo natural compuesto de fibras orgánicas simula un cemento. La estructura ondulada del nácar permite disipar la energía de deformación, limitando la propagación de grietas y aumentando la resistencia a la fractura. Esta estructura fue replicada en el diseño de bloques de concreto con formas angulares y onduladas que, al ensamblarse, generan un anclaje mecánico que distribuye mejor los esfuerzo	El estudio utilizó simulaciones computacionales y pruebas experimentales para evaluar la resistencia de muros con bloques de concreto espumado aligerado, tanto en forma rectangular como con ángulo, sometidos a cargas sísmicas. Los resultados mostraron que los muros biomiméticos con bloques angulados distribuyen mejor los esfuerzos, reduciendo la concentración de tensiones en las juntas. En las pruebas de compresión diagonal, los muros con bloques angulados presentaron una mejora del 34% en la resistencia comparado con los muros de bloques rectangulares. Asimismo, en las simulaciones sísmicas, los muros angulados tuvieron un 25% menor desplazamiento horizontal, lo que indica una mejor capacidad de disipación de energía. Esto aumentó la durabilidad del muro, evitando fallos catastróficos y propagación rápida de grietas, en comparación con los muros convencionales. En términos de durabilidad, el muro inspirado en la concha nácar mostró una mayor tenacidad frente a cargas sísmicas debido a la mejor distribución de esfuerzos. Estos resultados confirman que los muros biomiméticos tienen un desempeño superior en zonas sísmicas al limitar las deformaciones y mejorar la resistencia a largo plazo.	Durabilidad	Muros en edificaciones en zonas de amenaza sismica
13	Propuesta de diseño de una vivienda rural sostenible bio inspirada para el municipio de Paipa, Boyacá-Colombia (Escalante et al., 2020)	El diseño de la vivienda rural sostenible en Paipa se inspira en las adaptaciones del Frailejón paipano (Espeletia paipana). Este enfoque biomimético se basa en dos características principales del frailejón: su estructura en roseta y la pubescencia de sus hojas. La estructura en roseta maximiza la captura de radiación solar y ayuda a la termorregulación, mientras que la pubescencia (vellos en las hojas) mejora la retención de agua al captar la condensación de la neblina	El diseño de la vivienda rural sostenible, inspirado en el frailejón paipano, utiliza su estructura en roseta para maximizar la captura de luz solar y mejorar la termorregulación de la vivienda. A través de una disposición modular, el diseño permite reducir la necesidad de calefacción artificial al aprovechar de manera eficiente la energía solar. Además, el sistema de condensación de agua, inspirado en las pubescencias del frailejón, atrapa la neblina en mallas situadas en las ventanas, recolectando agua condensada para su uso. Los resultados obtenidos muestran que este diseño biomimético no solo mejora la eficiencia energética, disminuyendo el consumo de calefacción, sino que también optimiza el uso del agua al captar y reutilizar la condensación de la neblina, contribuyendo así a la sostenibilidad y al aprovechamiento de los recursos naturales.	Eficiencia energetica	Edificaciones sostenibles y sistemas de climatizacion en viviendas
15	Soluciones biomiméticas para diseñar envolventes multifuncionales (Cruz et al., 2017)	Este trabajo explora el diseño de envolventes multifuncionales para edificios, inspirado en organismos naturales como las termitas y las avispas alfareras (Polybia sjinifex). Estos organismos construyen estructuras que regulan la temperatura, la ventilación y la humedad de manera pasiva, optimizando así las condiciones internas de sus hábitats.	La investigación emplea una metodología que imita las estrategias de termorregulación de los nidos de termitas y las avispas alfareras, incorporando materiales y diseños estructurales que permiten el flujo de aire y la regulación de la temperatura. Las estructuras de las avispas, que utilizan barro y arena, se caracterizan por una alta conductividad térmica, similar a la de ladrillos, lo que permite mantener una temperatura constante en el interior. Los experimentos de laboratorio demostraron que las envolventes basadas en estos modelos naturales pueden reducir las variaciones de temperatura interna en un 30%, lo que disminuye la dependencia de sistemas de calefacción y refrigeración artificiales	Eficiencia energetica	Edificaciones sostenibles y sistemas de climatizacion en edificios
18	Optimización estructural mediante algoritmos computacionales inspirados en la naturaleza. Casado Bravo, F. (2022).	Estos algoritmos imitan procesos naturales como la evolución biológica o el comportamiento de enjambres y partículas. Por ejemplo, el Algoritmo Genético simula la selección natural y la supervivencia del más apto, mientras que el Algoritmo de Enjambre de Partículas se basa en el comportamiento cooperativo de aves o peces. Estos procesos son aplicados en el diseño estructural para encontrar la configuración óptima de materiales y geometrías con el mínimo uso de recursos.	En el estudio, se evaluaron tres algoritmos NIA: Algoritmo Genético (GA), Algoritmo de Enjambre de Partículas (PSO) y Algoritmo de Búsqueda Gravitacional (GSA), en tres estructuras metálicas con distintos niveles de complejidad. Los algoritmos optimizan variables de diseño (sección, forma, geometría) bajo restricciones de deformación y tensión. Para el tercer caso (estructura de cubierta laminar de estadio), se alcanzó una mejora del 22% en el uso de material usando el PSO. El PSO destacó por requerir un menor número de iteraciones comparado con el GA y GSA.	Durabilidad y Eficiencia energetica	Diseño de estructuras metálicas optimizadas
19	Celoslas mecánicamente robustas inspiradas por esponjas de vidrio de aguas profundas. Fernandes, M. C., Aizenberg, J., Weaver, J. C., & Bertoldi, K. (2020).	la esponja de vidrio Euplectella aspergillum cuenta con una arquitectura en forma de cuadrícula reforzada por soportes diagonales. Estas estructuras están compuestas por elementos esqueléticos de sílice laminada, organizados en una disposición regular que aumenta la resistencia al pandeo y la propagación de grietas. El diseño imita cómo la esponja utiliza su disposición diagonal y sus uniones para resistir altas presiones a pesar de tener una estructura ligera y porosa.	El entramado inspirado en la esponja de vidrio mejora la resistencia al pandeo mediante la inclusión de refuerzos diagonales que distribuyen mejor las cargas. Cuatro diseños de entramado fueron evaluados, y el inspirado en la esponja (Diseño A) mostró la mayor resistencia crítica al pandeo bajo carga uniaxial, soportando un 9.55% más de carga antes de fallar en comparación con otros diseños sin refuerzos diagonales. El diseño demostró una alta eficiencia en la distribución de material, optimizando el uso sin aumentar el volumen total, logrando una mayor resistencia con la misma cantidad de material.	Durabilidad	Diseño de estructuras
20	Influencia del Patrón de Impresión en el Rendimiento Mecánico del Hormigón Reforzado con Fibras Impreso en 3D. Pham, L., Lu, G., & Tran, P. (2022).	la estructura jerárquica de la exoestructura del langosta americana (Homarus americanus) presenta una disposición helicoidal de fibras de quitina/proteína. Esta disposición permite la dispersión de tensiones y resistencia a fracturas debido a las capas apiladas helicoidalmente	El funcionamiento del hormigón impreso en 3D se estudió variando los patrones de impresión en unidireccional, cruzado (0°/90°), cuasi-isotrópico (0°/45°/90°) y helicoidal (10°, 20° y 30°). Los resultados mostraron que la disposición helicoidal con un ángulo de 10° proporciona la mayor mejora en la resistencia a la flexión. El hormigón reforzado con fibras de acero al 0.75% por volumen mejoró tanto la resistencia a la compresión como a la flexión, con un incremento en la resistencia a la compresión de hasta un 26.5% y a la flexión en un 73.5% en algunas configuraciones. Las fibras de acero distribuidas en múltiples direcciones permitieron reducir la dependencia direccional y mejorar la resistencia estructural	Durabilidad	Diseño de estructuras
21	Estadio Olímpico de Beijing 2008 como Biomimética de un Nido de Pájaro. Rogers, A., Yoon, B., & Malek, C. (2007)	El diseño del Estadio Nacional de Beijing, conocido como el "Nido de Pájaro", se inspira en la estructura de un nido de ave. Los arquitectos, Herzog & de Meuron, emularon la disposición entrelazada de ramas de un nido para crear una estructura de acero que rodea el estadio. Este diseño permite una alta resistencia estructural con una distribución eficiente del peso, mientras que la geometría abierta proporciona ventilación natural y reducción de cargas en condiciones sísmicas.	El estadio combina un anillo de asientos de concreto con una fachada de acero entrelazado, que funciona como estructura y diseño estético. La construcción requirió aproximadamente 40,000 toneladas de acero en forma de secciones huecas de alta resistencia a la torsión. Originalmente diseñado con un techo retráctil, el techo fue eliminado debido a recortes de presupuesto, lo que mejoró la eficiencia del uso de materiales. Además, las membranas de ETFE en la fachada permiten la entrada de luz natural y protegen del clima, mientras que las aberturas facilitan la ventilación pasiva, ayudando a mantener temperaturas confortables en el interior.	Durabilidad y eficiencia energetica	Diseño de estructuras
22	Fachadas Modulares Innovadoras como Herramienta para Contrarrestar los Efectos del Cambio Climático. Kamińska, P., & Michalak, H. (2022).	Este estudio utiliza inspiración en sistemas biológicos para desarrollar fachadas modulares que actúan como "pieles" adaptativas. Por ejemplo, una de las soluciones emula la capacidad de plantas y animales para responder a cambios climáticos, aplicando materiales inteligentes y tecnología paramétrica. Las fachadas están diseñadas para maximizar la luz natural, ofrecer ventilación, generar electricidad mediante paneles solares y captar agua de lluvia, en una integración que recuerda procesos biológicos de adaptación y eficiencia	Las fachadas modulares propuestas incluyen módulos multifuncionales que se adaptan a las condiciones ambientales. Algunas soluciones incorporan sistemas de sombreado que se ajustan a la luz solar y paneles solares en posiciones optimizadas, así como materiales reciclables y resistentes. Los módulos también facilitan la ventilación y la recolección de agua. En términos de eficiencia, se observó una reducción de hasta un 30% en el uso de energía y una mejora del 25% en la eficiencia térmica en comparación con edificios sin este tipo de fachadas	Eficiencia energetica	Diseño de fachadas de edificaciones
24	Arquitectura bioinspirada específica del sitio: Estudio de caso de la Casa Allen–Lambe de Frank Lloyd Wright. Hyde, R. (2023).	El enfoque biomimético del estudio se basa en la integración de la arquitectura con su entorno natural, imitando el comportamiento de los ecosistemas. La Casa Allen–Lambe refleja el principio de eco-mimesis, alineando la disposición y construcción con los ciclos naturales, como la luz solar y la circulación del aire. Además, emplea conceptos de arquitectura orgánica, enfatizando la armonía entre el edificio, el entorno, y el uso de materiales naturales, inspirándose en el paisaje de la pradera.	El diseño funcional de la Casa Allen–Lambe distribuye los espacios a través de un esquema lineal que optimiza la ventilación y la luz natural. La estructura se divide en varias zonas climáticas: una zona norte más fría y una zona sur cálida y expuesta al sol. Las paredes de alta masa térmica y el uso de materiales como piedra y madera ayudan a regular la temperatura. Se incorporan sistemas pasivos, como chimeneas y ventanas estratégicamente colocadas, que maximizan la eficiencia energética. Las superficies exteriores reflejan el entorno mediante ornamentos horizontales, imitando las líneas del paisaje.	Eficiencia energetica y Gestion de residuos	Diseños de viviendas
25	Comportamiento mecánico de estructuras tipo bambú bajo carga compresiva transversal. Wang, S., Wang, J., & Komvopoulos, K. (2023).	El enfoque biomimético se inspira en la estructura jerárquica del bambú, caracterizada por celdas hexagonales huecas y distribución graduada de fibras. Estas estructuras optimizan la absorción de energía y la resistencia al impacto, imitando la manera en que el bambú combina ligereza con robustez. Las celdas hexagonales replican la capacidad del bambú para distribuir tensiones, proporcionando una alta resistencia y deformabilidad sin fracturarse fácilmente	Las estructuras tipo bambú fueron impresas mediante estereolitografía 3D, con varias configuraciones de celdas hexagonales (A2.5, A5, A7.5, A10 y A15). Las pruebas mecánicas bajo carga transversal revelaron que las dimensiones de las celdas afectan significativamente las propiedades mecánicas. Por ejemplo, la estructura A2.5 mostró un módulo elástico de 203.88 MPa, una resistencia a la fractura de 8.16 MPa y una densidad de energía de deformación de 0.299 J/m³. Las estructuras más pequeñas demostraron mayor capacidad de absorción de energía y mejor distribución de las tensiones, confirmando su potencial para aplicaciones de alta demanda mecánica.	Durabilidad	Estructuras ligeras y Andamios modulares
26	Diseño para la robustez: Perspectivas bioinspiradas en ingeniería estructural. Kiakojouri, F., De Biagi, V., & Abbracciavento, L. (2023).	El enfoque biomimético del estudio se centra en dos estrategias clave inspiradas en la naturaleza: la compartimentalización, que se inspira en mecanismos naturales como la autotomía en animales y la respuesta hipersensible (HR) en plantas, y la complejidad, donde los sistemas complejos aseguran la robustez mediante redundancia y cooperación entre múltiples subsistemas, como ocurre en la red vascular del cerebro humano o en los sistemas de colateralidad en las arterias, y el artículo usa estas analogías naturales para proponer diseños robustos que permitan estructuras resistentes al colapso progresivo bajo condiciones extremas.	El proyecto estudia la robustez estructural utilizando conceptos bioinspirados para evitar que fallos locales provoquen colapsos mayores, proponiendo dos enfoques principales: la compartimentalización, que introduce discontinuidades planificadas en la estructura, como juntas de expansión, para contener el daño en una zona específica, como se menciona del ejemplo de las juntas del Pentágono que limitaron el daño tras el ataque del 11 de septiembre, y la complejidad, que crea sistemas con caminos de carga alternativos (Alternate Load Paths, ALP) que permitan redirigir fuerzas ante fallos, como la circulación colateral en el cuerpo humano.	Durabilidad	Edificaciones y puentes
27	Comportamientos protectores de la estructura de columna de panal de pared delgada bioinspirada contra losas de hormigón armado bajo carga de impacto. Wang, S., & Xia, H. (2023).	El estudio se inspira en la estructura del élitro de los escarabajos, una cubierta dura y ligera que protege a los insectos contra impactos, y se traduce en un diseño de estructura tipo panal de pared delgada (BHTS, por sus siglas en inglés) para funcionar como una capa intermedia amortiguadora entre un martillo de impacto y una losa de hormigón armado (RC), donde la estructura BHTS, similar al élitro del escarabajo, disipa energía mediante su deformación controlada y se mantiene liviana sin comprometer su capacidad de absorber cargas dinámicas.	El sistema propuesto funciona introduciendo una interfaz amortiguadora entre la losa de hormigón armado y el impacto directo de un objeto, reduciendo así los daños estructurales; se probaron diferentes energías de impacto (0.618 kJ, 1.236 kJ y 1.854 kJ), registrando una máxima fuerza de impacto de 42.33 kN y una máxima deformación de la losa de 6.55 mm bajo una carga de 1.854 kJ, mostrando una reducción significativa de la deformación gracias a la capa BHTS fabricada en AlSi10Mg (aleación de aluminio) con un módulo de Young de 69 GPa y resistencia de cedencia inicial de 220 MPa.	Durabilidad	Edificaciones
28	Optimización de uniones tubulares inspiradas en la naturaleza para impresión 3D de metal. Kanyilmaz, A., Berto, F., Paoletti, I., Caringal, R. J., & Mora, S. (2020).	Este estudio emplea un enfoque biomimético inspirado en las estructuras tubulares de la naturaleza, como los huesos y los troncos de árboles, que presentan alta resistencia y rigidez con un peso mínimo. Se utiliza un proceso de optimización topológica y la tecnología de impresión 3D en metal para crear uniones tubulares que imitan los nodos reforzados de las plantas, especialmente el bambú, logrando una geometría de unión que distribuye las cargas de forma eficiente y reduce las concentraciones de estrés.	En este proyecto, se optimizan las uniones tubulares mediante el método de optimización de material isotrópico sólido con penalización (SIMP). Se modelan formas de unión complejas en CAD y se analizan bajo condiciones de carga asimétrica usando simulaciones de elementos finitos para maximizar el rendimiento estructural. El diseño resultante de las uniones optimizadas reduce el peso en un 30-50% en comparación con los diseños convencionales y disminuye las tensiones máximas en hasta un 81% en comparación con las uniones sin refuerzo. Además, las simulaciones de impresión en 3D muestran que la orientación de 45° y el tratamiento térmico postimpresión reducen significativamente las tensiones residuales y evitan deformaciones indeseadas.	Durabilidad y Gestion de residuos	Edificaciones

Nota. La figura presentada hace referencia a la matriz encontrada en el **Anexo B.** Fuente: Elaboración propia.

7.2 Evaluaciones de Sostenibilidad

7.2.1 Durabilidad

Identificación de factores de durabilidad. Como punto de partida, se utilizó el documento de Anaya Estévez et al. (2018), que propone una matriz de factores basada en la norma ISO 15686 para estimar la vida útil de las edificaciones en Colombia. De este documento, se identificaron los factores y subfactores que influyen directamente en la durabilidad de las construcciones, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2

Factores para la estimación de la vida útil de las construcciones en Colombia

ID	FACTORES	DESCRIPCION
1	**Calidad del diseño arquitectónico**	**Calidad del diseño arquitectónico y constructivo. Incluye la calidad de los trabajos a nivel de proyecto. La calidad depende de la experiencia del diseñador y de su preparación (capacitación, certificación).**
2	**Calidad de los materiales y componentes de construcción.**	**La calidad de los materiales depende de su fabricación y manufactura, deben cumplir con las normas técnicas para cubrir las necesidades funcionales y ambientales de las edificaciones**
2.1	Función física y mecánica	Materiales que al momento de la inspección cumplen con las siguientes propiedades y características: 1.Resistencia 2.Rigidez 3.Ductilidad 4.Dureza 5.Tracción 6.Compresión 7.Torsión 8.Flexión
2.2	Función constructiva	El inmueble cuenta con estudios previos y aplicados, teniendo en cuenta factores innovadores que lo hacen sobresalir de los demás.
2.3	Función económica	Existe disponibilidad de materia prima y adicionalmente cuenta con materiales sustitutos de fácil accesibilidad
3	**El medio ambiente del interior del edificio**	**Condiciones como la temperatura, ventilación, iluminación, humedades, influyen directamente en el deterioro de los componentes constructivos**

3.1	Ventilación	Cuenta con sistemas provistos para la ventilación con especificaciones técnicas, certificados e informes de equipos y dispositivos referentes a la ventilación del inmueble
3.2	Mantenimiento de redes y/o instalaciones	Existen protocolos y rutinas de mantenimientos predictivo y preventivo periódicos de instalaciones eléctricas, hidráulicas, cubiertas y canales de recolección que se efectúan rigurosamente y conforme a una programación establecida.
4	**El medio ambiente externo al edificio, como el clima y la contaminación urbana**	**Factores como el viento, humedades, lluvia ácida, radiación o ciertos hongos del ambiente van a influir directamente en el deterioro de los componentes constructivos.**
4.1	Clima	Presenta un diseño y estructura que mitigan los efectos negativos ocasionados por el aire o las precipitaciones.
4.2	Topografía	La topografía tiene una estructura especializada bajo criterios específicos de estudios y diseños.
4.3	Amenazas y riesgos	El inmueble se encuentra construido para soportar cualquier tipo de riesgo y amenaza a pesar de encontrarse en zona de alto riesgo mitigable.
4.4	Humedad	El inmueble ha sido diseñado y construido adecuadamente para prevenir las condiciones adversas del nivel freático. Cuenta con sistemas de bombeo y drenaje.
5	**Calidad y nivel de la mano de obra**	**Es muy importante que las personas que vayan a ejecutar los trabajos de construcción e instalaciones estén plenamente capacitadas y preparadas para tales.**
5.1	Acabados	Acabados óptimos y con altos estándares de calidad de: -Cimientos -Muros -Acabados de muro -Cubiertos -Entrepisos -Pisos -Carpinterías en puertas, ventanas -Detalles arquitectónicos.
6	**Uso del edificio con base en manuales y especificaciones realizadas por los diseñadores y constructores para una mejor operabilidad del inmueble.**	El uso que se espera que tenga el inmueble influye en la degradación y el deterioro del edificio y de su parte. Se debe considerar para su diseño y para cuando se esté utilizando.

6.1	Uso (Alto, mediano y bajo impacto)	La construcción presenta un uso esperado, con las características constructivas indicadas en cuanto a los materiales, diseño y durabilidad.
7	**Grado o nivel de mantenimiento de acuerdo con las especificaciones asentadas en manuales, procedimientos y/o protocolos de mantenimiento.**	**El nivel y la calidad de los trabajos de mantenimiento determinarán que el edificio alcance su vida útil estimada.**
7.1	Manual de mantenimiento (Instrucciones, requisitos, politicas e información).	Mantenimiento efectuado rigurosamente y de acuerdo a las especificaciones del manual de mantenimiento. Aplica mejores prácticas y es innovador
7.2	Sin manual de mantenimiento	Realiza mantenimiento al inmueble de tipo predictivo y preventivo.

Nota. Adaptado de "Propuesta matriz de factores para la estimación de la vida útil de las construcciones en Colombia con base en la norma ISO 15686" por A. Anaya, Castellanos, Ceballos, Cifuentes, Niño, Beltrán, Rojas & Rubio, 2018, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

A partir de la revisión literaria inicial, se seleccionaron nueve documentos relevantes que abordan la durabilidad en materiales y diseños de edificaciones con enfoques biomiméticos. Cada documento fue evaluado con el fin de identificar las propiedades específicas de los materiales o diseños presentados que influyen directamente a los factores identificados previamente en la tabla 2.

Se recopilaron y organizaron los valores cualitativos y cuantitativos de cada propiedad identificada, distinguiendo entre el enfoque biomimético y el convencional, lo cual permitió una evaluación comparativa de cada propiedad.

El desarrollo de la metodología descrita anteriormente resultó en una matriz, en la que se recopilaron todos los datos necesarios para evaluar, de manera precisa y detallada, el impacto positivo de las aplicaciones biomiméticas en la durabilidad de las construcciones. Esta matriz, además, integra

sistemáticamente los factores y subfactores identificados en la normativa ISO 15686 y en la propuesta de Anaya Estévez et al. (2018), permitiendo así organizar y comparar propiedades específicas de los materiales y diseños analizados desde dos enfoques: biomimético y convencional. A continuación, en la figura 18 se observa la composición de la matriz de evaluación de la durabilidad.

Figura 18

Matriz de evaluación de la durabilidad

DURABILIDAD EN LA CONSTRUCCION									
ID	NOMBRE DEL PROYECTO	MATERIAL O DISEÑO	FACTORES DE DURABILIDAD (ISO 15686)	PROPIEDADES	ENFOQUE BIOMIMETICO		ENFOQUE CONVENCIONAL		EVALUACION DE DURABILIDAD
					CUANTITATIVAS	CUALITATIVAS	CUANTITAVITAS	CUALITATIVAS	
[1]	Hormigón autorreparable con bacterias y reforzado con fibras naturales: principios y aplicaciones en Ecuador. (Sierra, G., Mera, W., & Jonkers, H. 2016).	Hormigon	Factor 2. Calidad de los Materiales y Componentes de Construcción	Resitencia a la compresion	30 MPA	N/A	26 MPA	N/A	Incrementar la resistencia a la compresión del concreto optimiza el diseño estructural, reduce la porosidad, y protege contra agentes agresivos, mejorando la durabilidad y prolongando la vida útil de las construcciones.
				Resitencia a la flexion	5.7 MPA	N/A	5.4 MPA	N/A	Aumentar la resistencia a la flexión del concreto permite ahorrar materiales y refuerzos, mejora la seguridad estructural al resistir cargas sin agrietarse, y reduce la penetración de agentes dañinos, prolongando su durabilidad.
			Factor 4. El medio ambiente externo al edificio	Resiliencia frente a condiciones ambientales	N/A	Resistente, con buen desempeño en ambientes cíclicos de congelamiento y descongelamiento	N/A	Menor resistencia a ciclos extremos; tiende a agrietarse bajo estas condiciones	La resiliencia del concreto ante condiciones ambientales extremas es esencial para prolongar su durabilidad, reducir costos de mantenimiento y asegurar la integridad estructural.
			Factor 7. Grado o nivel de mantenimiento	Capacidad de autoreparacion	Sellado de grietas de maximo 0.6 mm, requiriendo menos mantenimiento	N/A	No cierra grietas, lo que hace que requiera mas mantenimiento.	N/A	El concreto autorreparable previene corrosión y deterioro sellando microfsuras automáticamente, mejorando así la durabilidad y reduciendo el mantenimiento.
[5]	Biomimetismo en la construcción: ladrillos de adobe estabilizados con glicoproteínas para una mayor resistencia a la compresión inspirados en los montículos de termitas (Ballia & Vahdati, 2024)	Ladrillos de adobe	Factor 2. Calidad de los Materiales y Componentes de Construcción	Resistencia a la compresion	la adición de 1 %, 3 % y 5 % de BSA produjo un aumento del 125,8 %, 147,4 % y 202,6 % en la resistencia media a la compresión.	N/A	Menor resistencia a la compresión, aproximadamente 1 - 2 MPa sin aditivos.	N/A	La estabilización biomimética de ladrillos de adobe con glicoproteínas aumenta su resistencia y durabilidad, mejorando estabilidad estructural
[7]	Materiales fotocatalíticos y sus aplicaciones en construcción (García & Espiga, 2016).	Materiales de construccion	Factor 4. El medio ambiente externo al edificio	Reduccion de contaminantes atmosfericos	Capacidad de eliminar ente 10 - 65 % de NOx en condiciones óptimas	N/A	No contribuye a la reducción de contaminantes atmosféricos	N/A	La aplicación biomimética en materiales que reduzcan contaminantes NOx, minimiza corrosión, prolonga la durabilidad estructural y disminuye costos de mantenimiento en edificaciones.
				Durabilidad en ambientes urbanos	N/A	Mayor resistencia a condiciones urbanas debido a la menor adherencia de agentes contaminantes y degradantes.	N/A	Menor resistencia en ambientes urbanos, debido a la acumulación de agentes contaminantes y degradantes.	Los materiales fotocatalíticos ofrecen mayor resistencia a contaminantes urbanos
			Factor 7. Grado o nivel de mantenimiento	Capacidad de autolimpieza	N/A	Menor frecuencia y costos de mantenimiento debido a propiedades autolimpiantes	N/A	Mayor tiempo y costo de mantenimiento por no tener propiedades autolimpiantes.	La autolimpieza en materiales reduce la frecuencia y costo de mantenimiento
[10]	Estudio de muros aligerados con un diseño basado en la estructura de la concha nácar para aplicaciones en zonas sísmicas (Mena, 2021)	Muros de bolque	Factor 2. Calidad de los Materiales y Componentes de Construcción	Resistencia al esfuerzo cortante	16.13 MPA	N/A	15.98 MPA	N/A	La mayor resistencia cortante en los muros biomiméticos mejora la estabilidad estructural, reduciendo el riesgo de fallas y aumentando la durabilidad.
				Ductilidad	4.36 mm	N/A	3.61 mm	N/A	El incremento de la ductilidad a 4.36 mm permite que los muros absorban mejor las deformaciones, aumentando su capacidad de soportar cargas sísmicas.
				Tenacidad	N/A	Capacidad de resistir una parte de la carga maxima desúes de la fractura	N/A	No resisten cargas despues de la fractura	La capacidad de los muros biomiméticos para resistir cargas tras la fractura prolonga su integridad estructural en eventos de carga intensa o sismos.
			Factor 4. El medio ambiente externo al edificio	Disipacion de energia	N/A	Los angulos entre bloques reducen el desplazamiento horizontal, ayudando a la disipacion de energia, comportandose mejor ante un sismo	N/A	Los muros de bloques rectangulares presentan una menor capacidad de disipacion de energia.	Los ángulos entre bloques en diseño biomimético mejoran la disipación de energía
[16]	Compuestos cementicios estructurados tipo nácar, resistentes y dúctiles. Gupta, S., Esmaeeli, H. S., & Moini, R. (2024)	Compuestos cementicios	Factor 2. Calidad de los Materiales y Componentes de Construcción	Resistencia a la fractura	73.68 MPa.mm1/2	N/A	6.62 MPa.mm1/2	N/A	mejora su capacidad de soportar cargas sin fracturarse, aumentando la durabilidad estructural.
				Ductilidad	19 veces mayor en comparacion al cemento convencional	N/A	El cemento convencional presenta valores menores de ductilidad.	N/A	La ductilidad 19 veces superior en el compuesto biomimético permite absorber mejor las tensiones, reduciendo el riesgo de fracturas en condiciones extremas.
			Factor 4. El medio ambiente externo al edificio	Disipacion de energia	N/A	Presenta un deslizamiento entre placas y propagación de grietas, aumentando su capacidad de absorción de energía.	N/A	El cemento convencional carece de los mecanismos de deslizamiento y propagación de grietas, limitando su capacidad de absorción de energía.	La capacidad de deslizamiento y propagación de grietas en el diseño biomimético maximiza la absorción de energía, mejorando la resistencia en eventos sísmicos.
[18]	Optimización estructural mediante algoritmos computacionales inspirados en la naturaleza. Casado Bravo, F. (2022).	Dieño de estructuras	Factor 2. Calidad de los Materiales y Componentes de Construcción	Optimizacion de la seccion	N/A	Búsqueda de la configuración óptima para minimizar el material empleado manteniendo la capacidad estructural.	N/A	En métodos convencionales, el ajuste de la sección se realiza manualmente, resultando en un uso de material mayor y con menor eficiencia en la distribución de cargas.	Al optimizar la sección, se busca minimizar el material utilizado mientras se asegura una adecuada capacidad de carga y resistencia.
				Optimizacion de la geometria	N/A	Variación de la disposición nodal para mejorar la resistencia de la estructura bajo carga.	N/A	La geometría tradicional no suele optimizarse nodalmente, lo cual limita la estabilidad de la estructura.	Al optimizar nodalmente, se puede distribuir mejor las fuerzas y cargas, mejorando la estabilidad general y la eficiencia del diseño. Esto permite crear estructuras más seguras y duraderas.
				Optimizacion tipologica	N/A	Distribución del material en el espacio de forma óptima, eliminando elementos menos solicitados.	N/A	La construcción convencional no distribuye el material según demandas de carga específicas, generando áreas subutilizadas	Al emplear la optimización topológica, se logra una mejor distribución del material, eliminando el exceso y concentrándolo donde es realmente necesario, lo que mejora la eficiencia y la resistencia de la construcción.
[19]	Celosías mecánicamente robustas inspiradas por esponjas de vidrio de aguas profundas. Fernandes, M. C., Aizenberg, J., Weaver, J. C., & Bertoldi, K. (2020).	Dieño de estructuras	Factor 2. Calidad de los Materiales y Componentes de Construcción	Resistencia a la compresión y pandeo	N/A	El diseño inspirado en la esponja Euplectella alcanza el mayor esfuerzo crítico de pandeo entre los diseños analizados, mostrando una mejor resistencia en comparación con otras celosías.	N/A	Las celosías convencionales sin refuerzos diagonales presentan un menor esfuerzo crítico de pandeo y son más propensas a la inestabilidad bajo carga.	La estructura inspirada en esponjas mejora la estabilidad ante pandeo, aumentando la durabilidad y la capacidad de soportar cargas críticas sin deformación.
				Optimización de peso y material	N/A	Gracias a la estructura de doble diagonal de la esponja, se logra una optimización en el uso de material, permitiendo una relación alta de resistencia/peso.	N/A	En las estructuras convencionales, el material se distribuye de forma menos eficiente, lo que incrementa el peso y reduce la relación resistencia/peso.	La optimización biomimética en el uso de material permite una mejor relación resistencia/peso, prolongando la vida útil y reduciendo el desgaste estructural.
				Adaptación a cargas multidireccionales	N/A	La estructura cuadrada reforzada diagonalmente es capaz de soportar cargas aplicadas en múltiples direcciones sin pérdida significativa de rigidez.	N/A	Las estructuras tradicionales no cuentan con la misma adaptabilidad a cargas variables, presentando menor rigidez cuando la carga no está alineada con los elementos principales.	La estructura cuadrada diagonal absorbe cargas en múltiples direcciones sin perder rigidez, mejorando la durabilidad en condiciones de carga variables.
[23]	El estándar biodigital: Ladrillos de arcilla impresos en 3D, elásticos y duraderos. Estévez, A. T., & Abdallah, Y. K. (2022).	Ladrillos de arcilla	Factor 2. Calidad de los Materiales y Componentes de Construcción	Resistencia a la compresion	El modelo V1 soporto cargas de 240 N	N/A	Los ladrillos convencionales soportan cargas de 200 N	N/A	La capacidad de soportar 240 N en ladrillos biomiméticos incrementa la durabilidad estructural, permitiendo aplicaciones en construcciones con mayores exigencias de carga.
			Factor 4. El medio ambiente externo al edificio	Elasticidad pre fractura	El modelo V2 soporto 160 N con una mayor deformacion	N/A	Los ladrillos convecionales no cuentan con esa propiedad	N/A	La elasticidad mejorada en el modelo V2 de ladrillos biomiméticos permite soportar deformaciones antes de la fractura, reduciendo el riesgo de fractura.
				Elasticidad post fractura	El modelo V3 soporto 200 N con una mayor deformacion	N/A	Los ladrillos convecionales no cuentan con esa propiedad	N/A	La elasticidad post-fractura en el modelo V3 asegura que los ladrillos mantengan integridad estructural parcial tras una fractura, prolongando la vida útil.

Nota. La figura presentada hace referencia a la matriz encontrada en el **Anexo C.** Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan las evaluaciones realizadas sobre las propiedades más relevantes que influyen en la durabilidad de las construcciones, enfocándose principalmente en las propiedades mecánicas de los materiales, ya que estos factores determinan la capacidad de las estructuras para resistir condiciones de uso prolongado, cargas dinámicas y otros factores adversos.

Resistencia a la compresión del concreto autorreparable. La resistencia a la compresión del concreto es un factor clave tanto en el diseño estructural como en la durabilidad de las construcciones. Al incrementar esta resistencia, de 26 MPa a 30 MPa mediante un enfoque biomimetico aplicado a la autorreparacion del concreto, es posible diseñar elementos estructurales con secciones transversales más reducidas, lo que se traduce en ahorros de materiales y espacio, facilitando la optimización de costos y la integración de la estructura en el entorno arquitectónico. Adicionalmente, los elementos de concreto con mayor resistencia pueden soportar cargas más elevadas, incrementando así la capacidad portante de la estructura y mejorando su capacidad para resistir esfuerzos a largo plazo, lo que repercute directamente en su durabilidad.

La durabilidad del concreto está estrechamente relacionada con su porosidad y permeabilidad, propiedades que afectan la capacidad del material para resistir la penetración de líquidos y gases, los cuales pueden contener sustancias agresivas que deterioran la estructura (Solís & Alcocer, 2019). A mayor resistencia a la compresión, el concreto suele tener una menor porosidad, lo que reduce la entrada de agentes agresivos y protege sus componentes internos. De hecho, existe una relación inversamente proporcional entre la porosidad y la resistencia a la compresión, como señalan León y García (2022), quienes explican que una menor porosidad disminuye las probabilidades de que especies agresivas ingresen en la masa del concreto y causen daños estructurales.

Finalmente, el aumento en la resistencia a la compresión del concreto no solo optimiza el diseño y reduce costos estructurales, sino que también refuerza la durabilidad de las construcciones al minimizar la porosidad y, con ello, la penetración de agentes dañinos. Esta relación directa entre

resistencia y durabilidad contribuye significativamente a extender la vida útil del concreto y sus componentes, protegiendo las estructuras frente a condiciones adversas y promoviendo una mayor sostenibilidad en la construcción.

Resistencia a la flexión del concreto autorreparable. Una mayor resistencia a la flexión del concreto tiene implicaciones significativas para el diseño y la durabilidad de las construcciones. En primer lugar, permite diseñar elementos estructurales, como vigas y losas, con secciones transversales más reducidas, lo cual conlleva un ahorro en materiales y en refuerzos longitudinales, optimizando los recursos sin comprometer la integridad estructural. Además, al soportar esfuerzos de tracción más altos, los elementos son menos propensos a agrietarse o fracturarse, lo que refuerza la seguridad y estabilidad de la estructura en condiciones de carga. Este incremento en la resistencia también reduce la formación de fisuras, limitando la penetración de agentes agresivos que puedan deteriorar el concreto internamente. Así, una mayor resistencia a la flexión contribuye a prolongar la vida útil de la estructura, incrementando su durabilidad y protegiéndola contra daños ambientales a largo plazo.

Resiliencia frente a condiciones ambientales del concreto autorreparable. La resiliencia del concreto frente a condiciones ambientales adversas es crucial en un contexto donde los fenómenos climáticos extremos son cada vez más frecuentes, lo que resalta la importancia de elegir materiales capaces de soportar estos desafíos (Magno Concretos, 2024). Factores ambientales como el clima, la ubicación geográfica y los cambios climáticos contribuyen al deterioro gradual de las estructuras de concreto, generando laceraciones que disminuyen su resistencia, durabilidad y funcionalidad (García Barreto, 2020). El concreto al aumentar su resiliencia a condiciones ambientales reduce la necesidad de aditivos adicionales para prolongar su vida útil, optimizando así su desempeño y minimizando los costos de mantenimiento a lo largo del tiempo. Esta capacidad de resistencia ante factores externos es fundamental para asegurar una durabilidad prolongada, garantizando la integridad de las construcciones.

Capacidad de autorreparación en el concreto. La incorporación de capacidades de autorreparación en el concreto, especialmente mediante enfoques biomiméticos, representa un avance significativo en la durabilidad de las construcciones. Esta propiedad permite que el material selle automáticamente pequeñas fisuras, evitando la penetración de agentes agresivos como agua, cloruros y dióxido de carbono, que pueden provocar corrosión en el refuerzo y deterioro del concreto. Según Sierra et al. (2016), incluso grietas muy finas pueden permitir el ingreso de estos agentes, contribuyendo a la corrosión del acero de refuerzo y, en consecuencia, a la disminución de la durabilidad, la capacidad de carga y la vida útil de una estructura de hormigón.

En contraste, el concreto tradicional requiere intervenciones manuales para reparar fisuras, las cuales suelen realizarse cuando las grietas son lo suficientemente grandes como para ser detectadas y tratadas. Como señala Gerrard (2023), "El Prof. Paine explica: la belleza del concreto autorreparable es que está tratando de reparar grietas que normalmente no repararía porque son demasiado pequeñas. Con concreto normal, debe esperar a que la reparación sea bastante grande antes de poder hacer algo al respecto. Mientras que el hormigón autorreparable puede resolver los problemas incluso antes de que surjan."

Al abordar proactivamente las microfisuras, el concreto autorreparable reduce la necesidad de mantenimiento y prolonga la vida útil de las estructuras, mejorando su desempeño y durabilidad.

Resistencia a la compresión en ladrillos de adobe. Según Balila & Vahdati, 2024, la aplicación de un enfoque biomimético en la estabilización de ladrillos de adobe mediante glicoproteínas ha demostrado un incremento de hasta un 202,6% en su resistencia a la compresión, lo que tiene implicaciones significativas para la durabilidad de las construcciones. Este aumento permite que los elementos estructurales soporten cargas más elevadas sin sufrir deformaciones o fallas, mejorando la estabilidad y seguridad de la edificación. Además, al emular procesos naturales, se logra una integración más armoniosa con el entorno y una reducción en el uso de materiales sintéticos. En resumen, la

estabilización de ladrillos de adobe con glicoproteínas no solo mejora su capacidad estructural, sino que también contribuye a la durabilidad y sostenibilidad de las construcciones.

Reducción de contaminantes atmosféricos. La aplicación de principios biomiméticos en materiales de construcción, como recubrimientos fotocatalíticos que reducen entre un 10% y un 65% de óxidos de nitrógeno (NOx) bajo condiciones óptimas de luz solar, tiene implicaciones significativas en la durabilidad de las edificaciones. Estos recubrimientos, inspirados en procesos naturales, descomponen contaminantes atmosféricos, disminuyendo la acumulación de sustancias nocivas en las superficies de las construcciones. Al reducir la acumulación de contaminantes, se minimiza la corrosión y el deterioro de los materiales, prolongando la vida útil de las estructuras. Además, al mantener las superficies más limpias, se reducen los costos de mantenimiento y se mejora la estética de las edificaciones. Por lo tanto, la integración de tecnologías biomiméticas que disminuyen la contaminación ambiental no solo contribuye a la sostenibilidad urbana, sino que también mejora la resistencia y longevidad de las construcciones.

Resistencia al esfuerzo cortante. Un incremento en la resistencia al esfuerzo cortante de los muros, de 15,98 MPa a 16,13 MPa como se describe en (Mena Osorio, 2021), aunque pueda parecer pequeño, tiene efectos positivos en la estabilidad y seguridad estructural. Esta mejora permite que los muros soporten cargas laterales más intensas, como las provocadas por sismos o fuertes vientos, reduciendo así el riesgo de fallas por cortante. Además, una mayor resistencia al cortante ayuda a controlar la aparición y expansión de fisuras diagonales, lo cual limita la entrada de agentes agresivos que podrían afectar a la estructura. En consecuencia, este aumento en la resistencia al esfuerzo cortante contribuye a mejorar la durabilidad y preservar la integridad de la estructura a lo largo del tiempo.

El incrementar el desplazamiento a la fractura de los muros de bloque de 3,61 mm a 4,36 permite que los muros puedan deformarse más antes de fracturarse. Como resultado, se incrementa la

vida útil de la construcción, ya que los muros son más resistentes a daños y degradación a lo largo del tiempo.

Tenacidad en muros de bloques en concreto. Los muros bioinspirados, en particular, muestran un incremento en tenacidad, ya que después de la fractura continúan soportando una parte de la carga máxima. Este comportamiento puede atribuirse al anclaje mecánico generado por los ángulos de contacto entre bloques, que reduce el desplazamiento horizontal y permite disipar la energía generada por las cargas, simulando la estructura jerárquica del nácar (Mena Osorio, 2021). Según Miao et al. (2019), esta estructura similar al nácar no solo permite una absorción localizada de energía mediante deformación y entrelazamiento, sino también una absorción distribuida a través de delaminación y fricción entre capas. La integración de estos principios bioinspirados en los muros de bloque incrementa su tenacidad y resiliencia, mejorando su capacidad de soportar condiciones adversas y prolongando su durabilidad, al mismo tiempo que se fortalece su sostenibilidad y se asegura una mayor integridad estructural en el tiempo.

Asimismo, se observa que, en los muros construidos con bloques rectangulares, la falla se concentra principalmente en las juntas, extendiéndose a través de los bloques; en contraste, en los muros con bloques en ángulo, la falla se distribuye tanto en los bloques como en las juntas. Este patrón de falla más distribuido en los muros con bloques en ángulo justifica la mayor tenacidad y resistencia al esfuerzo cortante reportadas en las pruebas de compresión diagonal (Mena Osorio, 2021).

Resistencia a la fractura. Un incremento significativo en la resistencia a la fractura, de 6,62 MPa·√mm a 73,68 MPa·√mm, tiene importantes implicaciones en la durabilidad y seguridad de las construcciones, ya que permite al material soportar mayores esfuerzos a flexion antes de que una grieta se inicie y propague, reduciendo así la posibilidad de fallas catastróficas. La resistencia a la fractura depende de varios factores, como el tipo de carga aplicada, la geometría del componente (incluyendo la

forma de la pieza y la ubicación de la grieta) y las características de la grieta en cuanto a su longitud, profundidad y ángulo en relación con la dirección de la carga.

Según Gupta et al. (2024), en los materiales bioinspirados en la estructura del nácar, los principales mecanismos que contribuyen a la resistencia a la fractura incluyen la propagación tortuosa de las grietas, la gran deformación entre capas, la formación de puentes entre las grietas y el deslizamiento de las pastillas. Estos mecanismos de endurecimiento permiten que el material disperse la energía de la carga aplicada, reforzando su capacidad para resistir la fractura.

Ductilidad. El enfoque biomimético basado en estructuras tipo nácar mejora significativamente la ductilidad de los materiales cementicios mediante mecanismos como el deslizamiento de tabletas hexagonales separadas por intercaladores elastoméricos, que permiten absorber más energía antes de la fractura, la propagación tortuosa de grietas que dispersa el daño y reduce su avance, y la deformación de las capas intermedias que disipan la energía aplicada. Estas estrategias replican los mecanismos del nácar natural, logrando un aumento del hasta 19 en la ductilidad, comparado con compuestos cementicos tradicionales.

Optimización estructural. La aplicación de algoritmos inspirados en la naturaleza al diseño de estructuras permite optimizar tanto la sección como la geometría de los componentes, logrando una distribución precisa del material. Este enfoque minimiza el uso de recursos al eliminar excesos y concentrar el material en áreas críticas, lo que no solo asegura una capacidad de carga adecuada y una resistencia óptima, sino que también mejora la eficiencia de la construcción. Al distribuir las cargas de manera más uniforme, estas estructuras optimizadas resultan más seguras y duraderas, capaces de soportar condiciones de uso intensivo y prolongar su vida útil.

Resistencia a la compresión en ladrillos de arcilla. Mejorar la resistencia a cargas de compresión en ladrillos de arcilla de 200 N a 240 N tiene implicaciones significativas para la durabilidad y el rendimiento estructural de las construcciones. Este aumento permite que los ladrillos soporten mayores

cargas sin sufrir deformaciones o fracturas, ampliando su versatilidad y permitiendo su uso en estructuras de mayor envergadura o en áreas que requieren soportar cargas importantes, lo cual es muy valioso en zonas sísmicas.

Elasticidad pre y post fractura en ladrillos de arcilla. Mejorar la elasticidad de los ladrillos de arcilla, tanto en la etapa previa como posterior a la fractura, tiene un impacto significativo en la durabilidad y seguridad de las construcciones. Al incrementar la elasticidad antes de la falla, los ladrillos son capaces de absorber y disipar de manera más efectiva las tensiones generadas por cargas o impactos, lo cual reduce la probabilidad de fracturas iniciales y protege la integridad del material. Por otro lado, la elasticidad postfalla proporciona a los ladrillos una capacidad de recuperación parcial, permitiéndoles seguir soportando cargas limitadas incluso después de haber sufrido una fisura.

7.2.2 Eficiencia Energética

La evaluación de la eficiencia energética en construcciones se fundamentó en los factores clave identificados por el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible: diseño pasivo, aislamiento térmico, iluminación natural, materiales de construcción y energías renovables. Inicialmente, se identificaron estos factores como aspectos esenciales para optimizar el consumo energético en edificaciones. A partir de esta clasificación y la revisión bibliográfica realizada inicialmente, se seleccionaron los seis documentos más relevantes que abordan directamente cada uno de estos factores, lo cual permitió generar una matriz de análisis.

En esta matriz se registraron las propiedades más influyentes de cada factor, facilitando una visión integral de cómo impactan en la eficiencia energética de las edificaciones. Finalmente, la matriz sirvió como base para realizar la evaluación energética de los proyectos analizados, permitiendo un enfoque estructurado y detallado sobre el aporte de cada propiedad a la sostenibilidad y eficiencia de las construcciones. A continuación, en la figura 19 se observa la composición de la matriz de evaluación de la eficiencia energética.

Figura 19

Matriz de evaluación de la eficiencia energética

EFICIENCIA ENERGETICA EN LA CONSTRUCCION						
ID	NOMBRE DEL PROYECTO	MATERIAL O DISEÑO	PROPIEDADES	CUANTITATIVAS	CUALITATIVAS	EVALUACION DE EFICIENCIA ENERGETICA
[2]	Influencia de las piedras fotoluminiscentes en la iluminación y las propiedades mecánicas del concreto (Medina & Moreno, 2018)	Material	Bioluminiscencia	Brillan por 8 horas despues de una absorcion de luz de 10 a 30 minutos	Al disminuir el uso de iluminación artificial, se logra una reducción en las emisiones de CO_2	La incorporación de piedras bioluminiscentes reduce la iluminación artificial en exteriores sin afectar las propiedades mecánicas del concreto, mejorando la eficiencia energética.
[4]	Mejora de la eficiencia energética en fachadas de vidrio mediante estrategias de diseño biomimético (Büşra, Güneş & Semra, 2024)	Material y diseño (Fachadas)	Control de la cantidad de luz	N/A	se puede reducir la cantidad de luz solar y calor que ingresa, lo que ayuda a mantener una temperatura agradable interior	El diseño biomimético en fachadas de vidrio reduce hasta un 32% la carga energética anual, regulando luz y calor para un ambiente sostenible
			Aislamiento termico	Conductividad termica λ (W/mK) = 0.011	N/A	La óptima conductividad y transmitancia térmica en fachadas reduce pérdidas y entrada de calor, minimizando el uso de sistemas de climatización artificiales y mejorando la eficiencia energética.
				Transmitancia termica U (W/m2K) = 0.57	N/A	
[11]	Biomimesis espacial: Análisis de la planta Totora y su vinculación con la arquitectura (Rivera, 2023)	Material y diseño (Fachadas)	Aislamiento termico	Conductividad termica λ (W/mK) = 0.045	N/A	La baja conductividad térmica de la totora ofrece excelente aislamiento, reduce la climatización artificial y mejora la eficiencia energética en edificaciones sostenibles.
[13]	Propuesta de diseño de una vivienda rural sostenible bio inspirada para el municipio de Paipa, Boyacá-Colombia (Escalante et al., 2020)	Diseño (Edificaciones)	Termorregulacion	N/A	la vivienda mantiene temperaturas internas estables mediante un patio central, claraboyas y un invernadero adosado que capta y distribuye el calor	La incorporación de estrategias de termorregulación inspiradas en el Frailejón permite mantener temperaturas interiores estables, disminuyendo la dependencia de sistemas de climatización artificial
[15]	Soluciones biomiméticas para diseñar envolventes multifuncionales (Cruz et al., 2017)	Diseño (Fachadas)	Termorregulacion	N/A	El diseño permite que el flujo de aire natural regule la temperatura de las edificaciones	Al regular la temperatura interior a través del flujo de aire natural sin sistemas mecánicos, se optimiza la eficiencia energética de la edificación
[22]	Fachadas Modulares Innovadoras como Herramienta para Contrarrestar los Efectos del Cambio Climático. Kamińska, P., & Michalak, H. (2022).	Diseño (Fachadas)	Optimizacion en la captacion de energia solar	N/A	las fachadas modulares mejoran el confort térmico al permitir un mejor control de la temperatura interior y una adecuada iluminación natural	Las fachadas modulares, al mejorar la captación y regulación de luz natural y calor, optimizan la eficiencia energética al reducir la necesidad de iluminación y climatización artificial

Nota. La figura presentada hace referencia a la matriz encontrada en el **Anexo D**. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan las evaluaciones realizadas sobre las propiedades más relevantes que influyen en la eficiencia energética de las construcciones.

Bioluminiscencia. La incorporación de agregados bioluminiscentes en construcciones representa una solución innovadora para mejorar la eficiencia energética, al ofrecer una fuente de iluminación autónoma y sostenible. Estos agregados, tras absorber luz solar durante 10 a 30 minutos, son capaces de emitir brillo por hasta 8 horas, lo que reduce significativamente la necesidad de iluminación artificial en áreas exteriores como jardines, senderos viales o peatonales y fachadas. Esta propiedad permite disminuir la dependencia de fuentes de luz convencionales, logrando así una reducción en los costos de energía y una menor emisión de gases de efecto invernadero. Es importante

considerar que la intensidad de la luz emitida depende de la cantidad de luz de exposición previa, lo cual resalta la importancia de ubicarlas en áreas con suficiente exposición solar (Medina & Moreno, 2018)

Es importante mencionar que según los resultados a pruebas de compresión y flexión al concreto expuestos en (Medina & Moreno, 2018), la inclusión de estos agregados bioluminiscentes no influye en las propiedades mecánicas del concreto.

Aislamiento térmico. La aplicación de estrategias de diseño biomimético en fachadas tiene un impacto notable en la eficiencia energética de las edificaciones. Inspiradas en mecanismos de termorregulación observados en la naturaleza, estas estrategias optimizan el comportamiento térmico de las fachadas mediante sistemas adaptativos como el vidrio electrocrómico y los módulos de doble piel, los cuales permiten controlar la entrada de luz y calor. Esto contribuye a reducir las cargas energéticas anuales hasta en un 32 % (Öztürk et al., 2024).

Un aspecto clave para alcanzar esta eficiencia es la conductividad térmica (λ) de los materiales utilizados, la cual puede variar significativamente, desde aislantes como la espuma de poliuretano con un valor de λ=0.026 W/mK hasta conductores como el cobre con un valor de λ=389 W/mK (Hernández, 2014). Cuanto menor es la conductividad térmica (λ), mayor es el poder aislante del material, lo que permite una menor transmisión de calor y mejores condiciones interiores en el edificio (Palomo Cano, 2017). Además, la transmitancia térmica (U) mide la velocidad con la que el calor se desplaza a través de los materiales; valores bajos de (U) indican un mejor aislamiento (Technology, 2024). En simulaciones realizadas por Öztürk et al. (2024), se obtuvieron valores óptimos de U=0.57 W/m2K y λ=0.011 W/mK, lo cual fortalece el aislamiento y la eficiencia de las fachadas.

Otro ejemplo de material con excelente capacidad de aislamiento térmico es la planta de totora, la cual aporta beneficios significativos a la eficiencia energética. Gracias a sus propiedades naturales, los paneles de totora reducen la transferencia de calor a través de paredes, techos y cubiertas, permitiendo mantener temperaturas interiores estables y disminuyendo la necesidad de sistemas de climatización

artificial. Con una conductividad térmica de 0.045 W/mK, estos paneles optimizan la retención de energía y contribuyen a reducir el consumo energético en edificaciones.

Además de sus propiedades térmicas, la totora, como material bioinspirado, promueve prácticas sostenibles al ser renovable y de bajo impacto ambiental. Así, su uso no solo mejora la eficiencia energética de las construcciones, sino que también apoya objetivos de sostenibilidad, al reducir el consumo de recursos no renovables y minimizar la huella de carbono de las edificaciones. Integrar estos materiales y diseños biomiméticos permite crear entornos más sostenibles y reduce el consumo energético, favoreciendo el confort interior y minimizando la demanda de sistemas de climatización.

Termorregulación. El aire caliente, debido a su menor peso y densidad, tiende a subir, mientras que el aire frío, por el efecto contrario, desciende, generando así corrientes convectivas (Piñeiro Lago, 2015). Este fenómeno es aprovechado en la ventilación natural o ventilación pasiva dentro de edificaciones de diseño biomimético, con un impacto significativo en la eficiencia energética. Inspirado en la regulación térmica de los nidos de termitas y de otros organismos de la naturaleza, este diseño permite que el flujo de aire natural controle la temperatura interna sin recurrir a amplios sistemas mecánicos, lo que reduce de manera considerable el consumo energético. El aire fresco ingresa por niveles inferiores y asciende gradualmente a medida que se calienta, creando un flujo que se expulsa a través de chimeneas superiores, imitando el “efecto chimenea” de las termitas. Este enfoque de ventilación logra renovar el aire interior, proporcionando un ambiente confortable y reduciendo la huella de carbono del edificio. Asimismo, al mantener una ventilación continua y estable, se alarga la vida útil de la estructura al evitar el desgaste por cambios bruscos de temperatura.

Uno de los casos más relevantes en esta área es el del edificio Eastgate center, donde aire caliente sube a través de las chimeneas de ladrillo en el tejado, lo que permite que el aire fresco de la noche entre desde la parte inferior. Durante el día, el aire frío almacenado en cavidades subterráneas se

libera en el edificio mediante una red de tuberías y túneles. Este método reduce la necesidad de aire acondicionado y consume mucha menos energía.

Otro caso relevante en arquitectura bioclimática es el diseño de una vivienda rural sostenible inspirado en el Frailejón paipano, que contribuye de manera significativa a la eficiencia energética y sostenibilidad. Este diseño utiliza estrategias de termorregulación de la planta, permitiendo que la vivienda mantenga temperaturas internas estables a través de un patio central, claraboyas y un invernadero adosado que captura y distribuye el calor. Esto disminuye la necesidad de sistemas de climatización artificial, creando un ambiente autosuficiente y confortable, con el respaldo de sistemas de captación de agua de neblina y fitodepuración de aguas grises.

Estos sistemas pasivos de control térmico pueden reducir el consumo energético de la vivienda entre un 30 % y un 50 %, optimizando los costos operativos y reduciendo la huella de carbono del proyecto.

7.2.3 Reducción de residuos

Esta evaluación se realizó conforme a lo establecido por el Ministerio de Ambiente en su Estrategia Nacional de Economía Circular (ENEC), la cual impulsa la eficiencia en el uso de recursos, la valorización de residuos y la adopción de prácticas sostenibles en distintos sectores productivos, con especial atención en la construcción sostenible. A partir de esto, se recopiló información de cuatro documentos identificados en el análisis literario que podrían ser relevantes para evaluar la reducción de residuos en la construcción. Posteriormente, se extrajo información de cada documento para identificar sus propiedades de sostenibilidad, junto con sus aspectos cuantitativos y cualitativos, realizándose su respectiva evaluación. La información fue consolidada en una matriz que se presenta a continuación.

Figura 20

Matriz de evaluación de reducción de residuos

REDUCCION DE RESIDUOS EN LA CONSTRUCCION						
ID	NOMBRE DEL PROYECTO	MATERIAL O DISEÑO	PROPIEDADES	CUANTITATIVAS	CUALITATIVAS	EVALUACION DE REDUCCION DE RESIDUOS
3	Enfoque biomimético aplicado al diseño de una vivienda unifamiliar en Portoviejo (Roldán, Vanga & Ortega, 2023)	Diseño	Uso de materiales ecologicos	N/A	La caña Guadua, al ser un material renovable, biodegradable y reciclable, reduce significativamente los residuos en comparación con materiales convencionales como el concreto, mientras que la pintura fotocatalítica contribuye a la reducción de desechos al disminuir la frecuencia de mantenimiento necesario.	La elección de materiales naturales y sostenibles como la caña Guadua y la pintura fotocatalítica reduce la generación de residuos en la fase de construcción y en el ciclo de vida del edificio. La implementación de estos materiales en el diseño biomimético de la vivienda representa un enfoque de construcción de bajo impacto ambiental, disminuyendo tanto residuos sólidos como la huella de carbono asociada al mantenimiento y operación de la edificación.
8	Aprovechamiento sostenible de residuos poliméricos como agregados del concreto: una revisión (Molina et al., 2021)	Material	Uso de residuos - Economia circular	N/A	Reutilización de plásticos no biodegradables en concreto disminuye residuos sólidos, promueve economía circular y mejora propiedades específicas como flexibilidad y aislamiento, aportando a una construcción más sostenible.	El uso de residuos poliméricos como agregados en el concreto ofrece una solución viable para la reducción de residuos en la industria de la construcción. Este enfoque biomimético disminuye la demanda de recursos naturales, reutiliza materiales de desecho y reduce la dependencia de vertederos. Aunque presenta menor resistencia a la compresión que el concreto convencional, es efectivo en aplicaciones no estructurales, fomentando prácticas sostenibles y minimizando el impacto ambiental
9	Evaluación de las propiedades mecánicas de ladrillos elaborados con residuos de vidrio y plástico. Análisis de las emisiones de dióxido de carbono (Howard et al., 2021)	Material	Uso de residuos y economia circular	Los ladrillos elaborados con residuos de plástico y vidrio generaron una emisión de 102 g de CO_2/kg de ladrillo, significativamente menor comparado con los métodos tradicionales, que pueden emitir entre 119 y 526 g de CO_2/kg	Al reemplazar parcialmente los componentes tradicionales, se reduce la demanda de materiales como la arcilla, que implica explotación del suelo y deforestación en su extracción.	Se evaluo que los ladrillos hechos con residuos de plástico y vidrio, lograron reducir emisiones de CO_2 en un 30% comparado con ladrillos tradicionales, gracias a una menor temperatura de fabricación (240 °C). Esto disminuye la demanda de energía y reutiliza materiales no biodegradables, contribuyendo a una economía circular y reduciendo la dependencia de recursos naturales como la arcilla, ofreciendo una alternativa más sostenible en la construcción.
17	Desarrollo de biomaterial a base de micelio y residuos madereros para el campo de la construcción. Alzate Restrepo, J. (2023)	Material	Uso de residuos y economia circular	Se estima que 326,972 m³ de residuos madereros generados se utilizan para producir aproximadamente 32,697 m³ de biomaterial de micelio y el uso de poliestireno expandido por biomaterial de micelio podría evitar emisiones de aproximadamente 2,452 toneladas de CO_2,	El uso de residuos madereros como sustrato para el biomaterial de micelio reduce los desechos sólidos y aprovecha recursos abundantes en la industria maderera. Además, su naturaleza biodegradable facilita una descomposición rápida, promoviendo un ciclo de vida más sostenible en la construcción.	El biomaterial de micelio ofrece una reducción significativa en la generación de residuos al reutilizar desechos madereros que de otra forma serían desechados o incinerados, prácticas que agravan la contaminación ambiental. Además, este biomaterial compite favorablemente en términos de impacto ambiental, donde el micelio presenta menor consumo de agua en comparación con el concreto (0.552 m³ eq frente a 0.747 m³ eq) y un potencial de reducción de CO_2 que beneficia al cambio climático.

Nota. La figura presentada hace referencia a la matriz encontrada en el **Anexo E**. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan las evaluaciones realizadas sobre las propiedades más relevantes que influyen en la reducción de residuos de las construcciones.

Uso de Residuos y Economía circular. El desarrollo de un biomaterial a base de micelio y residuos madereros ofrece una solución innovadora para reducir los desechos generados en la industria de la construcción. Según lo documentado por Alzate (2024), en Antioquia se movilizan aproximadamente 817,430 m³ de madera al año, de los cuales el 40%, es decir, 326,972 m³, termina como residuo maderero, por lo que, al reutilizar estos residuos como sustrato para el crecimiento de

micelio, este biomaterial contribuye significativamente a la reducción de desechos industriales, aprovechando un recurso abundante y normalmente desperdiciado.

Los cálculos brindados por (Fernández et al., 2020) demuestran que, si se utiliza la totalidad de los residuos madereros generados al año en Antioquia, se podrían producir cerca de 32,697 m^3 de biomaterial de micelio. Este enfoque permite evitar que estos residuos sean desechados en vertederos o incinerados, prácticas que, además de aumentar la carga de residuos, contribuyen a la contaminación ambiental.

Adicionalmente, la producción de biomaterial a base de micelio no solo disminuye los desechos sólidos, sino que también tiene un impacto positivo en la reducción de emisiones de CO_2. Al reemplazar materiales convencionales como el poliestireno expandido, que emite aproximadamente 3 kg de CO_2 por cada kg producido, el biomaterial de micelio podría evitar unas 2,452 toneladas de CO_2 en emisiones (Alzate, 2024). Esto puede representarse como una contribución importante a la mitigación del cambio climático, especialmente en un sector tan contaminante como el de la construcción.

La siguiente tabla tomada del estudio de Stelzer et al. (2021) refuerza esta evaluación al comparar el impacto ambiental de un bloque de micelio (con sustrato de cáñamo) con otros materiales convencionales. Aunque el micelio tiene un uso del suelo elevado 1,110 kg de Pt eq, presenta un impacto favorable en términos de escasez de agua, con un valor de 0.552 m^3 eq, menor que el de un bloque de concreto 0.747 m^3 eq. Este menor consumo de agua y la posibilidad de emplear residuos madereros ofrecen una ventaja sostenible adicional, ya que la reutilización de desechos de madera reduce el consumo de recursos y disminuye la dependencia de materiales de alta demanda hídrica.

Tabla 3

Comparación del impacto ambiental de un bloque de micelio en sustrato de cáñamo vs materiales convencionales

Categoría de impacto	Bloque de cáñamo a escala de laboratorio	Bloque de cáñamo a gran escala	Bloque de fachada	Bloque de limo-arena	Bloque de concreto
Acidificación (kg SO_2 eq)	0.024	0.012	0.024	0.009	0.021
Eutrofización (kg PO_4^{3} eq)	0.015	0.013	0.004	0.002	0.004
Cambio climático (kg CO_2 eq)	12.300	3.900	25.500	12.200	10.100
Uso del suelo (kg de Pt eq)	1110.000	1010.000	53.700	151.000	26.200
Escasez de agua (m^3 mundiales eq)	0.552	0.374	0.545	0.808	0.747
Smog (NO_x)	0.015	0.006	0.030	0.013	0.028

Nota. Adaptado de “Life cycle assessment of fungal-based composite bricks” por A. Stelzer, 2021, Sustainability, 13(21).

Se puede decir que, el biomaterial a base de micelio y residuos madereros representa una alternativa viable y sostenible para reducir los residuos en la industria de la construcción. Su uso permite transformar desechos en un recurso útil, contribuyendo a una economía circular y disminuyendo la presión sobre los vertederos.

Por otra parte, la producción de ladrillos elaborados con residuos plásticos y vidrio según el estudio de Howard et al. (2021), sigue un enfoque inspirado en la valorización de desechos, lo cual disminuye la cantidad de residuos en vertederos y reduce la demanda de materiales no renovables. En términos de datos cuantitativos, los ladrillos reciclados generan una emisión de CO_2 de 102 g/kg, notablemente menor en comparación con los métodos tradicionales que producen entre 119 y 526 g/kg, debido a la menor temperatura de fabricación que es de 240 °C frente a los 700-1500 °C que se usan en los convencionales. Esto permite un ahorro de energía y reduce el impacto ambiental, también, la reutilización de estos materiales disminuye la acumulación de plástico y vidrio en el ambiente y reduce la dependencia de recursos naturales, como la arcilla, necesarios para los ladrillos convencionales.

Los beneficios ambientales incluyen la reducción de desechos en vertederos y menor explotación de recursos naturales puesto que, a largo plazo esta práctica podría reducir la explotación de recursos no renovables y fomentar una economía circular al transformar residuos en materiales útiles.

Por último, la investigación abordada por Molina et al. (2021) destaca que la incorporación de residuos poliméricos como agregados en el concreto sigue principios de economía circular, reutilizando materiales en lugar de desecharlos y reduciendo la demanda de recursos naturales. Estos residuos se integran al concreto en diferentes tamaños y proporciones, entre el 5% y el 50%, optimizando la cohesión y trabajabilidad de la mezcla. Esta práctica proporciona una segunda vida útil para los polímeros, disminuyendo la acumulación de desechos en vertederos e incineración. Además, este concreto ecológico, al emplear residuos plásticos, genera una solución que contribuye a la sostenibilidad ambiental y reduce significativamente el volumen de desechos sólidos en la construcción. Es de aclarar quela resistencia a la compresión se ve reducida, pero se mejora la resistencia a la flexión, resistividad eléctrica y resistencia a la descongelación y congelación.

Uso de materiales ecológicos. Como lo menciona en su artículo Roldan et al. (2023) las viviendas biomiméticas diseñadas con caña guadua y pintura fotocatalítica reduce significativamente los residuos en comparación con métodos de construcción convencionales, ya que, la caña de guadua s un material renovable, biodegradable y reciclable, lo que disminuye los desechos en la fase de construcción y al final de su ciclo de vida, y la pintura fotocatalítica, por su capacidad de autolimpieza, reduce la necesidad de mantenimiento frecuente, evitando residuos adicionales.

Adicionalmente optar por guadua en lugar de concreto también reduce los residuos generados en el sitio, ya que no requiere moldes desechables. Además, al ser un recurso local en Colombia, la guadua disminuye el impacto ambiental relacionado con la producción y transporte de materiales, la durabilidad de la Guadua y la pintura fotocatalítica minimiza la necesidad de sustituciones y renovaciones, disminuyendo los desechos a lo largo del tiempo.

7.3 Análisis de factores externos

Se utiliza el análisis PESTEL para determinar los factores externos más relevantes en el ámbito político, económico, sociocultural, tecnológico, ecológico y legal, sobre los cuales no es posible actuar o influir directamente en la industria de la construcción al implementar el biomimetismo en Colombia.

7.3.1 Político

Apoyo Gubernamental para Sostenibilidad. En esta última década en Colombia este apoyo ha sido significativo, esencialmente en el sector de la construcción. Este respaldo se evidencia a través de políticas públicas, incentivos fiscales y programas que promueven prácticas sostenibles, lo cual puede facilitar la implementación del biomimetismo en la industria. A continuación, se detallan algunas de las iniciativas más relevantes.

Tabla 4

Iniciativas gubernamentales para la construcción sostenible

Iniciativas	Descripción
Política Nacional de Edificaciones Sostenibles (CONPES 3919 de 2018)	La presente política busca impulsar la inclusión de criterios de sostenibilidad dentro del ciclo de vida de las edificaciones, a través de instrumentos para la transición, seguimiento y control, e incentivos financieros que permitan implementar iniciativas de construcción sostenible con un horizonte de acción hasta el 2025 (ANLA, s.f).
Código de Construcción Sostenible	En el 2015, el gobierno colombiano promulgó uno de los primeros códigos obligatorios de construcción ecológica en Latinoamérica. Este código incluye requisitos mínimos para la construcción de nuevos edificios residenciales y comerciales, destinados a garantizar un menor consumo de energía y recursos que los edificios convencionales (CAMACOL, s.f).
Incentivos Fiscales	El gobierno colombiano ofrece incentivos como la exclusión del IVA y deducción de renta para equipos y elementos que contribuyan con la eficiencia energética. Estos beneficios fiscales están diseñados para fomentar la adopción de tecnologías y prácticas sostenibles en la construcción (Chamorro, 2022).

Programas de Capacitación y Sensibilización	La Cámara Colombiana de la Construcción (CAMACOL) han impulsado programas educativos para promover la certificación en construcción sostenible y la adopción de prácticas innovadoras en el sector. Estos programas buscan actualizar al sector en materia de construcción sostenible y resaltar las iniciativas y avances en política pública que han permitido movilizar al sector hacia un mejor futuro. (CAMACOL, 2023).

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Inestabilidad Política. Este factor puede afectar negativamente a la industria de la construcción en Colombia, ya que la incertidumbre en las políticas gubernamentales y la estabilidad en las instituciones públicas puede llevar a desincentivar la inversión y la adopción de prácticas innovadoras como el biomimetismo. La confianza en un entorno político estable es esencial para que las empresas se comprometan con proyectos a largo plazo y adopten nuevas tecnologías y enfoques sostenibles. Esta inestabilidad se manifiesta en varios aspectos:

- Conflictos entre poderes del Estado
- Investigaciones sobre financiamiento de campañas
- Protestas y manifestaciones
- Debates sobre reformas estructurales

Políticas de Importación. Dado que algunas soluciones biomiméticas requieren materiales o tecnologías específicas que pueden no estar disponibles en Colombia, las políticas de importación jugarán un papel importante. Restricciones en la importación de materiales ecológicos o nuevas tecnologías pueden limitar el desarrollo de biomateriales ya que, si los materiales o equipos específicos no se pueden importar fácilmente, los proyectos biomiméticos pueden enfrentarse a limitaciones significativas. A continuación, se describen elementos fundamentales de estas políticas y su posible efecto.

Tabla 5

Políticas de importación

Aranceles y Tributos Aduaneros	Colombia aplica aranceles a la importación de bienes, que varían según la clasificación arancelaria de cada producto. Estos aranceles pueden influir en el costo de materiales y tecnologías necesarios para implementar el biomimetismo en la construcción (Dianadmms, 2022).
Restricciones y Prohibiciones	Existen productos cuya importación está restringida o prohibida en Colombia, ya sea por razones de seguridad, salud pública o protección ambiental (Productos Que No Se Pueden Importar A Colombia: Guía de Restricciones E, 2024). Es fundamental verificar si los materiales o tecnologías relacionados con el biomimetismo están sujetos a estas restricciones para evitar inconvenientes legales.
Procedimientos Aduaneros	La Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales (DIAN) establece procedimientos específicos para la importación de mercancías, incluyendo requisitos documentales y autorizaciones previas. Cumplir con estos procedimientos es vital para garantizar el ingreso legal de materiales innovadores al país.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Iniciativas Internacionales y Tratados Ambientales. El gobierno colombiano en la última década ha demostrado un firme compromiso con la sostenibilidad y la protección ambiental mediante la adhesión a diversos acuerdos internacionales. No solo estos acuerdos evidencian la obligación del país en la protección del medio ambiente, sino que también brindan posibilidades para poner en práctica técnicas innovadoras, como el biomimetismo, en áreas como la edificación. A continuación, se describen algunos de los acuerdos más significativos y su importancia.

Tabla 6

Iniciativas y tratados internacionales de construcción sostenible

Acuerdos y convenios	Descripción
Acuerdo de París (2015)	Colombia ratificó este acuerdo en 2016, comprometiéndose a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 51% para 2030 y a alcanzar la neutralidad de carbono para 2050. Este compromiso impulsa la adopción de prácticas sostenibles en todos los sectores, incluyendo la construcción (Cancillería, 2018)

Convenio de Diversidad Biológica (CDB)	Este convenio busca la conservación de la biodiversidad, el uso sostenible de sus componentes y la participación justa en los beneficios derivados de la utilización de los recursos genéticos (Min Ambiente, s.f). La implementación del biomimetismo en la construcción puede alinearse con estos objetivos al inspirarse en soluciones naturales para el diseño y desarrollo de edificaciones.
Acuerdo de Escazú	Este tratado regional, ratificado por Colombia, promueve el acceso a la información, la participación pública y la justicia en asuntos ambientales en América Latina y el Caribe. Fomenta la transparencia y la inclusión en la toma de decisiones ambientales, aspectos esenciales para la implementación de prácticas sostenibles en la construcción (Min Ambiente, s.f.).
Tratado de Cooperación Amazónica (TCA)	Este tratado busca la preservación y el desarrollo sostenible de la Amazonía. La aplicación del biomimetismo en la construcción puede contribuir a estos objetivos al promover diseños que respeten y se integren con los ecosistemas amazónicos (Min Ambiente, s.f.).

Nota. Fuente: Elaboración propia.

7.3.2 Económico

Crecimiento Económico y Estabilidad Macroeconómica. Estos factores impactan en la habilidad de las empresas de construcción para invertir en innovación y nuevas tecnologías como el biomimetismo. A continuación, se describen los elementos clave de la economía de Colombia y cómo podrían afectar la adopción de prácticas innovadoras.

Crecimiento del PIB. En 2023, la economía de Colombia experimentó un aumento del 0,6%, evidenciando una ralentización en comparación con años previos. Se espera una recuperación para el año 2024, con un incremento previsto del 1,6%, de acuerdo con el Fondo Monetario Internacional (FMI). Esta tendencia se anticipa que persista, llegando a un 2,5% en 2025 (Mahecha, 2024). Esto podría motivar a las compañías a destinar inversiones en acciones sustentables.

Inflación y Política Monetaria. La tasa de inflación ha disminuido, cayendo a 6,1% en agosto de 2024, tras llegar a su punto máximo del 13,3% en marzo de 2023. El Banco de la República ha implementado una política monetaria restrictiva con el objetivo de mantener controlada la inflación, lo que ha resultado en la estabilidad macroeconómica. Un control de inflación y políticas monetarias

estables crean confianza en inversionistas y facilitan acceso a financiamiento para proyectos innovadores (OCDE: Colombia, 2024).

Disponibilidad de Financiamiento e Inversión. Este factor es crucial en la implementación de prácticas de edificación sostenible como el biomimetismo, dado que las compañías e inversores interesados pueden obtener financiación bajo condiciones ventajosas, lo que les facilita invertir en tecnologías y procedimientos innovadores que potencian la sostenibilidad y eficacia de sus proyectos. A continuación, se describen las fuentes y productos financieros más relevantes disponibles en el país que podrían simplificar esta implementación.

Tabla 7

Fuentes y productos financieros

Créditos Verdes y Líneas de Financiación Sostenible	
Crédito Constructor Sostenible (Bancolombia)	Diseñado para financiar proyectos de construcción sostenible, ofreciendo tasas preferenciales para proyectos que obtengan certificaciones reconocidas como EDGE, LEED o CASA. Este producto busca promover la construcción de inmuebles con estándares de sostenibilidad (Grupo Bancolombia, s. f.).
Constructor Profesional Sostenible (Banco de Bogotá)	Línea de financiación para proyectos de construcción que cumplan con estándares de sostenibilidad y estén en proceso de obtener certificaciones como EDGE, LEED, CASA, entre otras (Crédito Constructor Sostenible - bancodebogota.com, s. f.).
Constructor Profesional Sostenible (BBVA Colombia)	Ofrece financiación para proyectos de vivienda sostenible, con descuentos en tasas de interés de hasta 100 puntos básicos para proyectos que presenten certificaciones de sostenibilidad (BBVA, 2024).
Programas Gubernamentales e Incentivos	
Programa Colombia Sostenible (Nación y Banco Interamericano de Desarrollo)	Iniciativa que promueve la sostenibilidad ambiental y socioeconómica en municipios priorizados. Aunque su enfoque principal es rural, establece un precedente de apoyo a proyectos sostenibles que podría extenderse a áreas urbanas y de construcción (Programa Colombia sostenible, s.f.).
Financiamiento Verde (Ministerio de Vivienda)	Ofrece recursos y guías para facilitar el financiamiento de proyectos sostenibles en ciudades colombianas, promoviendo prácticas de construcción sostenible

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Competitividad y Presión del Mercado. Este factor busca la presión competitiva empresarial para que busquen de alguna manera la innovación en términos de sostenibilidad. Sin embargo, plantea ciertos riesgos para la adopción del biomimetismo en la construcción en Colombia los cuales se presentan a continuación.

Aumento de Costos para Ser Competitivos. Si otras empresas están adoptando soluciones sostenibles y ecológicas que son menos costosas o están más establecidas que el biomimetismo, las compañías que intenten implementar biomimetismo en el sector constructivo pueden enfrentar mayores costos sin lograr ventajas claras de mercado. Esto podría dificultar que la inversión en ideas biomiméticas se traduzca en un retorno competitivo inmediato, lo que genera una barrera de entrada.

Amenaza de Quedarse Rezagado. Si el biomimetismo en el campo de la construcción no se adopta lo suficientemente rápido y otras empresas desarrollan y comercializan prácticas sostenibles más económicas, las compañías que adopten enfoques biomiméticos tarde pueden quedar en desventaja en términos de competitividad, ya que habrán incurrido en mayores costos sin una garantía de aceptación o valor añadido en el mercado.

7.3.3 Sociocultural

Conciencia Ambiental y Valores Sostenibles. La creciente preocupación por el medio ambiente y los valores sostenibles es una oportunidad para que el biomimetismo en el sector de la construcción gane aceptación. En Colombia en los últimos años la sociedad cada vez está más comprometida con la protección del medio ambiente y la adopción de prácticas sostenibles, esto es una oportunidad para que el biomimetismo en el sector de la construcción gane aceptación. A continuación, se presentan datos y estudios que evidencian esta tendencia.

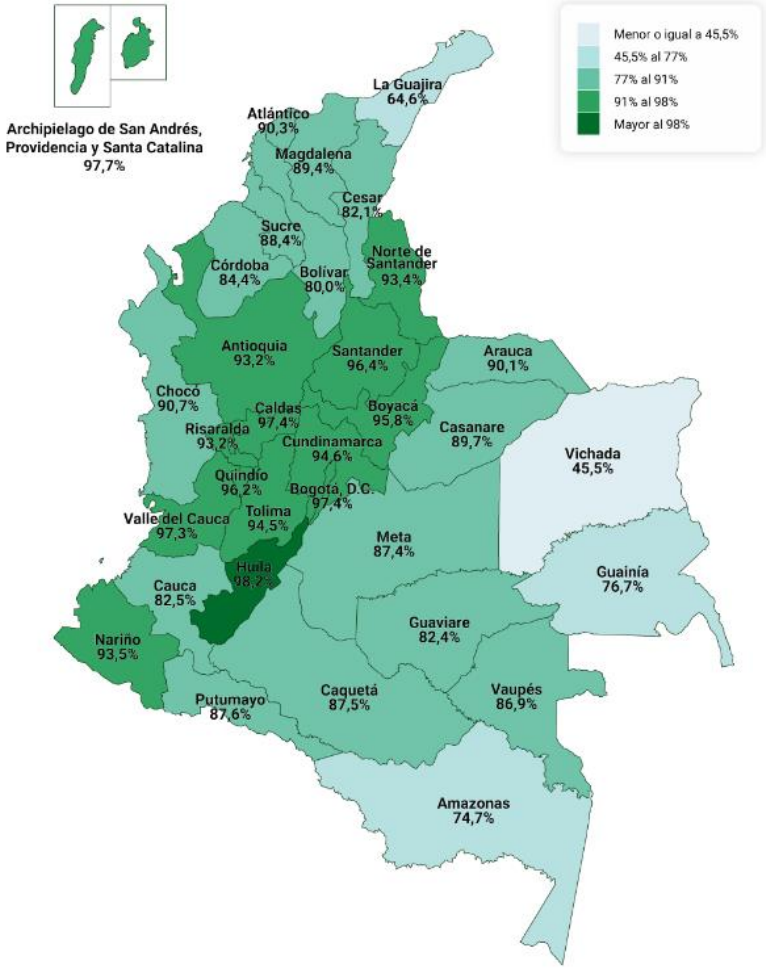
Figura 21

Sistema de ahorro de agua y energía

Nota. El censo CEED 2021 hecho por el DANE busco determinar el estado actual de la actividad edificadora en el país en términos de gestión de agua y energia. Adaptado de *Censo de Edificaciones - CEED 2021 por DANE, 2021, https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/ambientales/economia-circular.*

Figura 22

Hogares que realizan al menos una práctica para reducir el consumo de agua o energía



Nota. La ECV 2020 se diseñó para proporcionar datos representativos a nivel nacional, regional y por áreas urbanas y rurales, permitiendo así un análisis detallado de las condiciones de vida en diferentes contextos del país. Adaptado de *Encuesta de Calidad de Vida - ECV 2020 por DANE, 2020, https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/ambientales/economia-circular.*

Educación y Conocimiento sobre Sostenibilidad. Un nivel elevado de conocimiento en sostenibilidad y tecnología biomimética facilita la implementación de estos aspectos en el campo de la construcción. Sin embargo, en Colombia persisten desafíos que pueden obstaculizar la educación y el conocimiento del biomimetismo en la industria de la construcción.

- Limitaciones en la formación profesional: Aunque existen programas académicos que abordan la sostenibilidad, la integración profunda de conceptos como el biomimetismo en los pensum de arquitectura, ingeniería civil y otras disciplinas relacionadas es aún incipiente.
- Falta de integración multidisciplinaria: El biomimetismo demanda una estrecha cooperación entre campos como la biología, la ingeniería civil y la arquitectura. No obstante, en Colombia, todavía existen retos para fomentar una integración eficaz entre estas áreas.
- Escasez de capacitación continua Es escasa la variedad de programas de formación continua y especialización en sostenibilidad y biomimetismo. Esto complica que los expertos actuales actualicen sus saberes y capacidades para incorporar prácticas sustentables en sus proyectos.

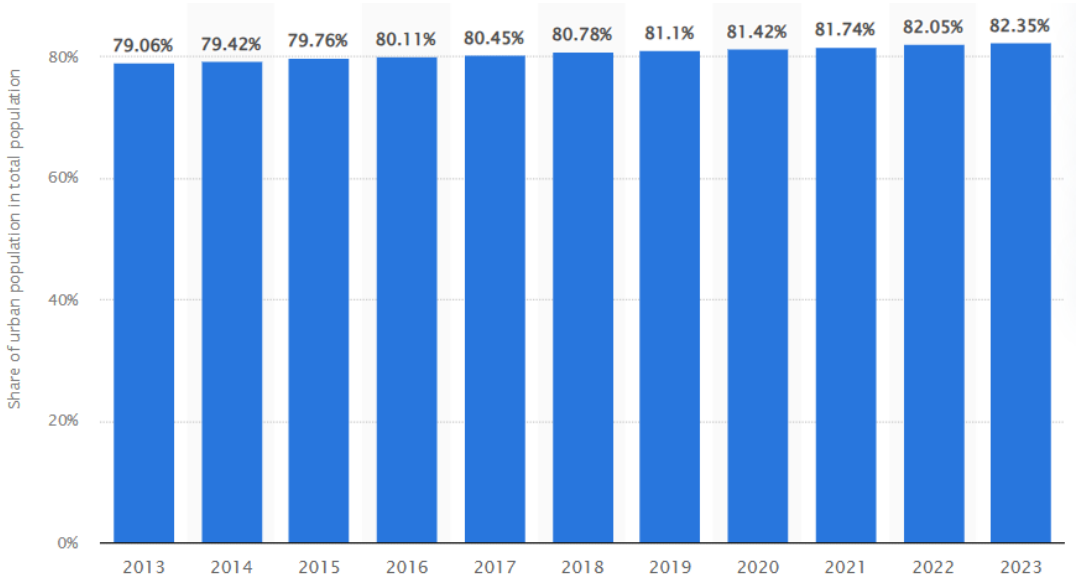
Demografía y Urbanización. La rápida urbanización en Colombia ha generado una creciente demanda de infraestructura y viviendas, lo que a menudo conduce a priorizar soluciones constructivas convencionales y de rápida implementación. Este enfoque puede limitar la adopción de prácticas innovadoras como el biomimetismo, que requieren más investigación y planificación, además suelen

implicar procesos de diseño y construcción más prolongados debido a la necesidad de investigación y adaptación de principios naturales a contextos urbanos.

Expansión de la Mancha Urbana. Los resultados del DANE (2018) indican que las principales ciudades del país han superado el 90% de nivel de urbanización, con un aumento significativo en el número de viviendas en áreas urbanas entre los censos de 2005 y 2018.

Figura 23

Urbanización en Colombia de 2013 a 2023



Nota. Según el Banco Mundial, en 2023, el 82,35% de la población colombiana residía en áreas urbanas, evidenciando un incremento constante en la urbanización del país. Adaptado de *Statista, 2024, https://www.statista.com/statistics/455795/urbanization-in-colombia/.*

Influencia de las Tendencias Globales. La popularidad de tendencias globales hacia la construcción ecológica y sostenible puede motivar a la industria local a adoptar enfoques biomiméticos para alinearse con estándares y expectativas internacionales. A continuación, se presentarán ejemplos de aplicaciones del biomimetismo a nivel global.

Tabla 8

Ejemplos globales basados en biomimetismo

Proyecto	Inspiración	Figura
East Gate Center (Zimbabue)	Montículo de termitas	
Gardens by the Bay (Singapur)	Cúpula de flores y bosque nuboso	
30 St Mary Axe (Reino Unido)	Conchas marinas	

Nota. Imágenes tomadas de Google imágenes. Fuente: Elaboración propia.

Impacto de los Medios de Comunicación y Redes Sociales. Este factor es vital dado que estos medios juegan un papel fundamental en la propagación de información acerca de la sostenibilidad y prácticas innovadoras como el biomimetismo en Colombia. A continuación, se describen elementos fundamentales de su influencia.

Cobertura Mediática de la Sostenibilidad. Un estudio de Rebold (2023) revela que, aunque la sostenibilidad y el cambio climático son temas relevantes, la cobertura mediática en Colombia aún es

limitada. Los medios tradicionales dedican menos espacio a estos temas en comparación con otros países de la región, lo que puede afectar la visibilidad de prácticas como el biomimetismo.

Influencia de las Redes Sociales en la Conciencia Ambiental. Las plataformas clave para la difusión de información ambiental son las redes sociales. Organizaciones y defensores usan estas herramientas para enseñar y motivar a la gente acerca de asuntos de sostenibilidad. No obstante, la difusión de noticias falsas y la ausencia de normativas pueden originar desinformación (Mora Chaves, 2021).

Desafíos en la Comunicación de la Sostenibilidad. Aunque ha habido progresos, continúan existiendo retos en la comunicación eficaz sobre asuntos sostenibles. La limitada capacitación especializada de los periodistas y la baja importancia asignada a estos temas en los medios de comunicación obstaculizan la divulgación de conceptos como el biomimetismo.

7.3.4 Tecnológico

Avances en Tecnologías de Construcción. El desarrollo tecnológico en Colombia en el campo de la construcción va por buen camino, algunos ejemplos como la impresión 3D y materiales inteligentes son positivos para facilitar la implementación de soluciones biomiméticas en la construcción. A continuación, se detallan algunos de los desarrollos más relevantes.

Tabla 9

Desarrollos tecnológicos de construcción en Colombia

Desarrollos tecnológicos	Descripción
Building Information Modeling (BIM)	Es una metodología que permite la creación de modelos digitales detallados de edificaciones, integrando información geométrica, de tiempos, costos y mantenimiento. En Colombia, la adopción de BIM ha sido impulsada por la Estrategia Nacional BIM 2020-2026, que busca que para 2026 el 100% de los proyectos de construcción públicos se desarrollen con esta metodología (R, 2023). Esta estrategia promueve la transformación digital del sector y facilita la integración de prácticas sostenibles como el biomimetismo.

Impresión 3D en construcción	Permite la fabricación de componentes constructivos con formas complejas y personalizadas, reduciendo tiempos y costos. En Colombia, esta tecnología se ha utilizado en la creación de maquetas y prototipos arquitectónicos, así como en la fabricación de elementos decorativos y estructurales (Tendencias Tecnológicas Aplicadas A la Construcción En Colombia, s. f.). Su aplicación facilita la experimentación con diseños inspirados en la naturaleza, propios del biomimetismo.
Inteligencia artificial y Big Data	La integración de análisis predictivo y big data en la construcción está revolucionando la gestión y planificación de proyectos. Estas tecnologías permiten recopilar y analizar grandes volúmenes de datos en tiempo real, proporcionando información valiosa para la toma de decisiones y la optimización de recursos (Admin, 2024). En Colombia, su aplicación facilita la implementación de soluciones biomiméticas al permitir una mejor comprensión y adaptación a las condiciones locales.
Construcción modular	Este método consiste en la fabricación de secciones de una estructura en un entorno controlado, que luego se ensamblan en el sitio de construcción. La construcción modular ofrece ventajas como la reducción de tiempos de ejecución y costos, además de minimizar el impacto ambiental (Argos, 2024). En Colombia, empresas como Argos han promovido soluciones modulares que pueden integrarse con principios biomiméticos para crear edificaciones más sostenibles.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Infraestructura Tecnológica y Acceso a Herramientas Digitales. Se puede decir que este factor tiene un impacto positivo en áreas metropolitanas que tienen empresas interesadas en invertir en herramientas digitales avanzadas en Colombia. No obstante, en áreas o empresas que se encuentren en el ámbito rural, el acceso a herramientas digitales e infraestructura tecnológica es limitado, lo cual dificulta la adopción de estrategias innovadoras como el biomimetismo. Esto se puede apreciar en la disparidad digital entre zonas urbanas y rurales, lo cual puede apreciarse en la disparidad digital entre zonas urbanas y rurales.

- Acceso a Internet: De acuerdo con el documento DANE (2022), el 66,7% de los hogares en áreas urbanas poseían acceso a internet, mientras que en zonas rurales esta cifra se

reducía al 23,4% La presente divergencia representa una disparidad digital que obstaculiza el acceso a datos y tecnologías avanzadas en áreas rurales.

- Disponibilidad de Equipos Tecnológicos: También un informe del DANE (2022) indico que el 42,3% de los hogares rurales no poseen computadores, en contraste con el 19,8% en zonas urbanas. Esta carencia dificulta la adopción de herramientas digitales esenciales para prácticas innovadoras en la construcción.

Colaboración Internacional y Transferencia de Tecnología. La participación en redes internacionales permite la transferencia de tecnologías y conocimientos, facilitando la adopción de prácticas innovadoras como el biomimetismo. A continuación, se detallan dos aspectos clave relacionados con este factor.

***Programa de Cooperación Técnica y Científica entre Colombia y México*:** En 2021, Colombia y México suscribieron un programa bilateral de cooperación, enfocándose en áreas como ciencia, tecnología e innovación (Agencia Presidencial de Cooperación Internacional, 2021). Este acuerdo facilita el intercambio de conocimientos y tecnologías aplicables a sectores como la construcción.

Iniciativas de Transferencia Tecnológica: Organizaciones como OCH Group destacan la importancia de la transferencia de tecnología en Colombia, señalando que la colaboración con otros países y organizaciones internacionales facilita el flujo de tecnología y conocimiento, beneficiando sectores como la construcción (Franco, 2024).

7.3.5 Ecológico

Biodiversidad y Riqueza Natural. Colombia es reconocida como uno de los países más biodiversos del mundo, albergando aproximadamente el 10% de la biodiversidad global. Según Chavez (2006) esta riqueza natural se manifiesta en una amplia variedad de ecosistemas y especies como:

- Aves: Colombia cuenta con más de 1.900 especies de aves, posicionándose como el país con mayor diversidad aviar a nivel mundial.

- Plantas: Se estima que existen entre 40.000 y 45.000 especies de plantas, representando aproximadamente el 10% de la flora mundial.
- Anfibios y Reptiles: El país alberga el 14% de las especies de anfibios y el 18% de las especies de reptiles del mundo.

La gran diversidad biológica brinda muchas posibilidades para crear tecnologías y diseños basados en la naturaleza, como la ventilación natural que se puede desarrollar al analizar la forma de los nidos de aves y termiteros, lo cual puede servir de inspiración para sistemas de ventilación pasiva en edificios, aumentando así la eficiencia energética. Analizar la estructura de plantas o conchas marinas puede conducir a la generación de materiales de edificación más resistentes y amigables con el entorno natural.

En Colombia, variados ecosistemas como selvas, páramos, costas y planicies muestran adaptaciones singulares que pueden ser un punto de partida para soluciones biomiméticas en el sector de la construcción.

Cambio Climático y Eventos Climáticos Extremos. En el último siglo, la temperatura promedio de Colombia ha aumentado en 1 °C, lo que ha intensificado fenómenos climáticos extremos y afectado la biodiversidad y los recursos hídricos del país (Orduz, 2022).

La frecuencia e intensidad de fenómenos como inundaciones, sequías y deslizamientos de tierra han incrementado, afectando infraestructuras y comunidades. Por ejemplo, entre 1998 y 2021, los deslizamientos de tierra y las inundaciones fueron los eventos climáticos que generaron mayores daños materiales y pérdidas de vidas humanas en Colombia (Ayala & Ospino, 2023).

La implementación del biomimetismo en la construcción ofrece soluciones inspiradas en la naturaleza que pueden mejorar la resiliencia de las edificaciones frente a eventos climáticos extremos. Los diseños que imitan estructuras naturales pueden ser más resistentes a vientos fuertes y sismos.

Disponibilidad de Recursos Naturales. El país alberga extensas áreas forestales que proporcionan madera y otros productos forestales no maderables, fundamentales para la construcción y el desarrollo de materiales sostenibles. Sin embargo, la deforestación, impulsada por actividades como la agricultura extensiva y la minería ilegal, ha reducido la disponibilidad de estos recursos y ha afectado a la biodiversidad. De acuerdo con el IDEAM (2020), en 2020 se deforestaron aproximadamente 171.685 hectáreas de bosque en Colombia, de acuerdo con el IDEAM (2020) De igual manera, la extracción intensiva de materiales como arena y grava ha causado impactos ambientales y disminuido la disponibilidad de estos recursos en ciertas regiones.

Utilizar un enfoque biomimético en la industria de la construcción puede generar nuevas soluciones para mejorar la eficiencia en el uso de recursos naturales y crear materiales de construcción más ecológicos. Dado que la inspiración en formas naturales puede llevar al desarrollo de materiales más fuertes y livianos, se puede disminuir la cantidad de recursos requeridos.

7.3.3 Legal

Normativas de Construcción Sostenible. En Colombia, las regulaciones que regulan la construcción han progresado para fomentar prácticas más respetuosas con el medio ambiente en la industria. No obstante, algunas normativas pueden suponer retos para la aplicación de métodos innovadores como el biomimetismo. A continuación, se expondrán las normativas actuales para la edificación sostenible.

Tabla 10

Normativa vigente construcción sostenible

Normativa	Función
Decreto 1285 de 2015	Establece lineamientos de construcción sostenible para edificaciones, enfocándose en el ahorro de agua y energía. Este decreto busca mejorar la calidad de vida de los habitantes y promover prácticas con responsabilidad ambiental y social (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2015).

Resolución 1026 de 2021	Adopta los parámetros y lineamientos técnicos para la construcción sostenible, detallando porcentajes obligatorios de ahorro en agua y energía según el clima y tipo de edificaciones. También establece procedimientos para la certificación y seguimiento de estas medidas (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021).

Nota. Fuente: Elaboración propia.

En Colombia, las normativas que regulan la construcción han progresado para fomentar prácticas más respetuosas con el medio ambiente en la industria. No obstante, algunas normativas pueden suponer retos para la aplicación de métodos innovadores como el biomimetismo.

A pesar de que estas regulaciones fomentan la sostenibilidad, su concentración en aspectos concretos como pruebas de materiales y estándares de diseño sismorresistente que requieran una perspectiva innovadora y sustentable puede restringir la implementación del biomimetismo en la edificación de Colombia, la rigidez en las exigencias técnicas y la inflexibilidad para adoptar tecnologías emergentes pueden desanimar a las compañías a indagar en métodos no tradicionales.

Adicionalmente, el rápido cambio de tecnologías y prácticas sustentables demanda que las regulaciones se actualicen de manera periódica para incluir innovaciones. Por lo tanto, largos procesos legislativos y la ausencia de mecanismos para la inclusión rápida de nuevas soluciones pueden postergar la puesta en marcha de prácticas como el biomimetismo.

Regulaciones Ambientales. En Colombia estas normativas buscan proteger el medio ambiente y promover prácticas sostenibles en la construcción. A continuación, se detallan las principales normativas y su impacto en el sector.

Tabla 11

Normativa ambiental en Colombia

Normativa	Funcion
Decreto 1076 de 2015	Conocido como el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, compila y actualiza las normas ambientales vigentes, facilitando su consulta y aplicación. Incluye disposiciones sobre licencias ambientales, gestión de recursos naturales y control de la contaminación.
Resolución 1257 de 2021	Establece estatutos sobre la gestión integral de Residuos de Construcción y Demolición (RCD). Establece lineamientos para la adecuada gestión de estos residuos, promoviendo su aprovechamiento y minimizando su impacto ambiental. (Min Ambiente, 2021)

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Estas regulaciones obligan a las empresas constructoras a implementar medidas que reduzcan el impacto ambiental de sus actividades, no obstante, a pesar de que las normativas medioambientales promueven la sostenibilidad, pueden suponer retos para la aplicación de métodos innovadores como el biomimetismo. Esto se debe a que la rigidez en determinados requisitos y la ausencia de estímulos concretos para tecnologías en desarrollo pueden restringir su adopción.

Propiedad Intelectual y Patentes. Un marco legal claro y sólido para la protección de innovaciones en materiales y diseños biomiméticos puede incentivar a las empresas a invertir en investigación y desarrollo. La posibilidad de patentar estas soluciones ofrece una ventaja competitiva y seguridad para recuperar las inversiones hechas. A continuación, se detallan leyes y decisiones relacionados con este asunto.

Tabla 12

Marco legal de propiedad intelectual en Colombia

Normativa	Funcion
Decisión 486 de la Comunidad Andina	Establece el Régimen Común sobre Propiedad Industrial para los países miembros, incluyendo Colombia. Esta normativa regula aspectos como patentes de invención, modelos de utilidad, diseños industriales y secretos empresariales.
Ley 23 de 1982	Regula los derechos de autor y derechos conexos en Colombia, protegiendo las obras literarias, artísticas y científicas.

Superintendencia de Industria y Comercio (SIC)	Es la entidad encargada de administrar el sistema de propiedad industrial en Colombia, incluyendo el registro de patentes y marcas. La SIC ofrece herramientas para la consulta de patentes y diseños industriales presentados en el país (Sede Electronica, s. f.)

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Un marco legal sólido en propiedad intelectual permite a los innovadores proteger sus desarrollos, otorgándoles derechos exclusivos de explotación y la posibilidad de licenciar o comercializar sus invenciones.

En el ámbito de la construcción, las patentes protegen innovaciones relacionadas con materiales, procesos constructivos y diseños arquitectónicos, la implementación del biomimetismo implica desarrollar soluciones inspiradas en la naturaleza, lo que puede resultar en invenciones patentables.

Por último, la posibilidad de obtener patentes puede incentivar a empresas y universidades a invertir en investigación y desarrollo de soluciones biomiméticas, contribuyendo al avance tecnológico en el sector de la construcción.

7.4 Matriz PESTEL

Con la información mencionada en el ítem anterior, se presentarán mediante una matriz PESTEL los factores externos de manera estructurada con el fin de identificar cuáles son una amenaza u oportunidad para la implementación del biomimetismo en la industria colombiana.

Tabla 13

Matriz PESTEL

Ámbito	Factor externo	Oportunidad / Amenaza	Impacto en el Biomimetismo
Político	Apoyo gubernamental para sostenibilidad	Oportunidad	Respaldo de políticas públicas, incentivos fiscales y programas que promueven prácticas sostenibles.
	Inestabilidad política	Amenaza	Genera incertidumbre en inversiones de de prácticas innovadoras a largo plazo.
	Políticas de importación	Amenaza	Restricciones en la importación de materiales ecológicos o nuevas tecnologías pueden limitar el desarrollo de biomateriales.
	Iniciativas internacionales y tratados ambientales	Oportunidad	Motivan la creación de políticas y regulaciones nacionales que apoyen prácticas de construcción sostenible y biomimética, además abren oportunidades de financiación y colaboración internacional.
Económico	Crecimiento económico y estabilidad macroeconómica	Oportunidad	Facilita a las empresas destinar recursos a la investigación y adopción de tecnologías innovadoras como el biomimetismo.
	Disponibilidad de financiamiento e inversión	Oportunidad	Las empresas e inversionistas interesados en prácticas de construcción sostenible como el biomimetismo pueden acceder a financiamiento con condiciones favorables.
	Competitividad y presión del mercado	Amenaza	Riesgos para la adopción del biomimetismo en la construcción debido al aumento de costos y competitiva empresarial.
Sociocultural	Conciencia ambiental y valores sostenibles	Oportunidad	Aceptación de construccion biomimética debido a protección del medio ambiente y la adopción de prácticas sostenibles.
	Educación y conocimiento sobre sostenibilidad	Amenaza	Comprensión de la sostenibilidad y el biomimetismo son limitados, tanto en los profesionales de la construcción como en los consumidores.
	Demografía y urbanización	Amenaza	Rápida urbanización y necesidad urgente de nuevas infraestructuras pueden llevar a priorizar soluciones convencionales y rápidas, en lugar de enfoques innovadores como el biomimetismo que requieren más investigación y planificación.

	Influencia de las tendencias globales	Oportunidad	Popularidad de tendencias globales hacia la construcción ecológica y sostenible puede motivar a la industria local a adoptar enfoques biomiméticos.
	Impacto de los medios de comunicación y redes sociales	Amenaza	Medios tradicionales dedican menos espacio a temas de sostenibilidad, por lo que puede afectar la visibilidad de prácticas como el biomimetismo.
Tecnológico	Avances en tecnologías de construcción	Oportunidad	Permiten experimentar con diseños inspirados en la naturaleza y materiales sostenibles.
	Infraestructura tecnológica y acceso a herramientas digitales	Amenaza	Acceso limitado en areas rurales o que no tienen acceso a tecnologia digital.
	Colaboración internacional y transferencia de tecnología	Oportunidad	Permite la transferencia de tecnologías y conocimientos, facilitando la adopción de prácticas innovadoras como el biomimetismo.
Ecológico	Biodiversidad y riqueza natural	Oportunidad	Ofrece una rica fuente de inspiración para soluciones biomiméticas, permitiendo que el sector de la construcción desarrolle diseños y materiales sostenibles basados en adaptaciones naturales.
	Cambio climático y eventos climáticos extremos	Oportunidad	Estructuras inspiradas en la naturaleza pueden adaptarse mejor a condiciones extremas.
	Disponibilidad de recursos naturales	Oportunidad	Optimizan el uso de recursos naturales y desarrollar materiales de construcción más sostenibles.
Legal	Normativas de construcción sostenible	Amenaza	Limita la innovación y adopción de biomateriales debido a la rigidez en los requisitos técnicos actuales y la falta de flexibilidad para incorporar nuevas tecnologías.
	Regulaciones ambientales	Oportunidad	Presentan desafíos para la implementación de biomimetismo debido a la rigidez en ciertos requisitos y la falta de incentivos específicos para tecnologías emergentes.
	Propiedad Intelectual y Patentes	Oportunidad	Incentiva la inversión en biomimetismo al ofrecer protección legal.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

7.5 Análisis de factores internos

Mediante el siguiente análisis se examinan fortalezas y debilidades en los factores internos de la industria de la construcción colombiana al implementar el biomimetismo, este análisis se centra en elementos que dependan de los recursos, capacidades, conocimientos técnicos, disposición hacia el cambio y limitaciones propias de la industria local.

7.5.1 Fortalezas

Experiencia en Construcción Sostenible. La industria colombiana ha avanzado en prácticas sostenibles gracias a proyectos de certificación CASA Colombia, LEED y EDGE. Esta experiencia proporciona una base sólida para incorporar principios biomiméticos, dado que muchas empresas ya están familiarizadas con los beneficios de construir de manera más ecológica. A continuación, se presentan proyectos emblemáticos de construccion sostenible que se han hecho en Colombia.

Tabla 14

Proyectos de construcción sostenible en Colombia

Proyecto	Descripción	Figura
Hospital San Vicente Fundación (Rionegro)	Fue el primer hospital en el país en recibir la certificación LEED en 2013, destacándose por su diseño y construcción sostenibles.	
Centro Empresarial y Recreativo Colsubsidio "El Cubo" (Bogotá)	Este proyecto obtuvo la certificación LEED, evidenciando el compromiso con prácticas sostenibles en edificaciones comerciales y recreativas.	

Acuarela del Río (Barranquilla)	Proyecto residencial que obtuvo la certificación CASA Colombia en diseño, demostrando la viabilidad de implementar prácticas sostenibles en viviendas de interés social.	
Edificio Ean Legacy de la Universidad EAN (Bogotá)	El edificio ha obtenido la certificación LEED en la categoría Oro, gracias a su estrategia ambiental aplicada en diseño, construcción y operación, logrando un ahorro de energía del 32% y una reducción en el consumo de agua potable del 35%.	

Nota. Imágenes tomadas de Google imágenes. Fuente: Elaboración propia.

Esta experiencia en ejecución de proyectos de construccion sostenible posiciona a la industria colombiana como un referente en la región andina, creando un entorno propicio para la adopción de prácticas innovadoras como el biomimetismo.

Redes y Colaboración Académica. La colaboración entre la industria de la construcción colombiana y el sector académico ha sido fundamental para impulsar prácticas sostenibles y la implementación del biomimetismo. Existen asociaciones con universidades y centros de investigación enfocados en sostenibilidad y biomimética.

Tabla 15

Practicas biomiméticas en universidades de Colombia

Universidades	Iniciativa
Universidad de los Andes	Ha desarrollado programas enfocados en el diseño inspirado en la naturaleza, como la Escuela de Verano en Diseño Inspirado en la Naturaleza, que busca integrar principios biomiméticos en la ingeniería y la arquitectura (UniAndes, 2022).

Pontificia Universidad Javeriana	Ha promovido investigaciones sobre nuevas maneras de crear arquitectura, incluyendo actores externos a la práctica y proponiendo experimentaciones en el eco-diseño de artefactos espaciales creados en colaboración con especies animales como el gusano de seda (Ballen, 2022).
Universidad del Norte	Investigadores han explorado la biomimética como mecanismo para transformar la arquitectura, proponiendo estrategias para una construcción biomimética del hábitat y analizando cómo la biomimética puede influir en materiales, productos y sistemas arquitectónicos.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Capacidad de Innovación y Flexibilidad de la Industria. La industria de la construccion ha mostrado una capacidad de adaptarse a nuevas normativas de sostenibilidad y avances tecnológicos, esta adaptabilidad facilita la adopción del biomimetismo, pues las empresas ya están familiarizadas con los beneficios de innovar y adoptar nuevas metodologías. A continuación, se destacan algunos aspectos clave.

Implementación de Metodologías Sostenibles. La industria ha adoptado prácticas de construcción sostenible, alineándose con estándares internacionales y locales. Se ha promovido la economía circular en el sector, impulsando la reutilización de materiales y la reducción de residuos (CAMACOL, 2024).

Colaboración con Startups y Contech. La industria ha fomentado alianzas con startups tecnológicas enfocadas en la construcción, promoviendo la innovación en la cadena de suministro y la gestión de proyectos. Colombia alberga al menos diez Contech, según el informe Contech Latam (2023), destacando la transformación digital en el sector.

Participación en Iniciativas Internacionales. Colombia ha participado en programas internacionales que promueven la innovación en la construcción. La Estrategia Nacional BIM 2020-2026 busca implementar el uso de BIM en proyectos públicos, alineándose con estándares globales y mejorando la competitividad del sector (ACIS, s. f.).

Estos esfuerzos reflejan una industria en constante evolución, dispuesta a integrar prácticas innovadoras como el biomimetismo, aprovechando su capacidad de adaptación y compromiso con la sostenibilidad.

Cultura Organizacional de Sustentabilidad. La cultura dentro de algunas empresas constructoras en Colombia ya valora la sostenibilidad como parte esencial de sus operaciones. Esta cultura promueve la aceptación y la motivación para implementar prácticas sostenibles, incluyendo el biomimetismo. A continuación, se destacan aspectos clave que evidencian esta evolución.

Adopción de Certificaciones de Construcción Sostenible. Empresas del sector han incorporado estándares internacionales como LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) y EDGE (Excellence in Design for Greater Efficiencies) en sus proyectos. Según el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (2024), hasta 2024, Colombia cuenta con más de 200 proyectos certificados LEED, posicionándose como líder en la región andina.

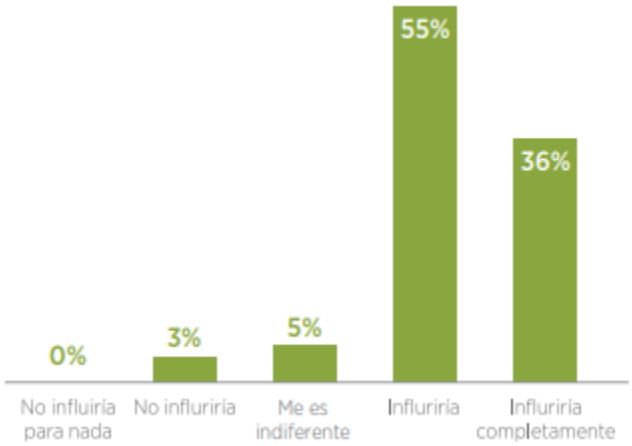
Implementación de Políticas Corporativas de Sostenibilidad. Grandes constructoras han desarrollado políticas internas orientadas a la sostenibilidad, como es el caso de la Constructora Bolívar la cual ha establecido programas de eficiencia energética y gestión de residuos en sus proyectos, promoviendo prácticas responsables entre sus colaboradores (Pacto Global Red Colombia, s. f.).

Formación y Capacitación en Sostenibilidad. La industria ha invertido en la capacitación de su personal en temas de sostenibilidad. Camacol, en colaboración con universidades, ofrece diplomados y cursos especializados en construcción sostenible, fortaleciendo las competencias de los profesionales del sector (CAMACOL, 2024).

Creciente Interés por Parte de Clientes y Stakeholders. Hay un aumento en el interés de clientes y stakeholders por proyectos sostenibles, lo que promueve la adopción del biomimetismo. Esto se debe a que los proyectos sustentables pueden incrementar la competitividad y cumplir con las expectativas del mercado. A continuación, se muestra información que demuestran esta tendencia.

Figura 24

Nivel de influencia en la decisión de compra de vivienda sostenible



Nota. Nivel de influencia en la decisión de compra de vivienda, si el banco le otorga un descuento de 0,65% en la tasa de su crédito hipotecario por tener un sello de construcción sostenible. Tomado de *Estado de la Construcción Sostenible,* 2021, CCCS.

Preferencias de los Consumidores. Un estudio de la Cámara Colombiana de la Construcción (2023) reveló que más del 57% de las familias que buscan vivienda en Bogotá y Cundinamarca están dispuestas a pagar más por soluciones de vivienda que incorporen elementos de sostenibilidad.

Infraestructura en Gestión de Residuos. Empresas en Colombia han comenzado a desarrollar infraestructuras para gestionar y reutilizar residuos de construcción y demolición, este enfoque en la reducción de residuos se alinea con el biomimetismo, que a menudo promueve la eficiencia de recursos.

Las empresas constructoras están obligadas a elaborar y implementar Programas de Manejo Ambiental de RCD, los cuales se enfocan en la prevención de la generación de residuos, su aprovechamiento y disposición final adecuada (Maat, 2022) Estos programas tienen como objetivo reducir el impacto ambiental de las actividades de construcción y demolición.

La normativa establece metas graduales para el uso de RCD, con el objetivo de que los grandes generadores utilicen un porcentaje no inferior al 2% del peso total de los materiales en una obra, con

incrementos anuales hasta alcanzar al menos un 30% (MinAmbiente, 2017) Esto fomenta la inclusión de materiales reciclados en nuevos proyectos de construcción.

7.5.2 Debilidades

Costos de Materiales y Tecnologías. La puesta en marcha de materiales y tecnologías biomiméticas en el sector de la construcción de Colombia se enfrenta a retos económicos considerables debido a los costos asociados en relación a los materiales y tecnologías convencionales. A continuación, se describen los elementos que inciden en esta circunstancia:

Costos de Investigación y Desarrollo.

- Inversión inicial elevada: El desarrollo de materiales biomiméticos requiere una inversión considerable en investigación para replicar estructuras y procesos naturales. Estos costos iniciales se reflejan en el precio final de los materiales.
- Tiempo de desarrollo: La complejidad de diseñar y producir materiales inspirados en la naturaleza puede prolongar el tiempo de desarrollo, incrementando los costos asociados.

Producción y Escalabilidad.

- Procesos de fabricación especializados: La producción de materiales biomiméticos a menudo implica técnicas avanzadas y equipos especializados, lo que aumenta los costos de fabricación.
- Economías de escala limitadas: Al ser tecnologías emergentes, la producción en masa de estos materiales es limitada, impidiendo la reducción de costos que se logra con mayores volúmenes de producción.

Comparación con Materiales Tradicionales.

- Disponibilidad y costos de materias primas: Los materiales tradicionales, como el hormigón y el acero, se benefician de una cadena de suministro establecida y materias primas abundantes, lo que reduce sus costos.
- Estandarización y normativas: Los materiales convencionales cuentan con normativas y estándares bien definidos, facilitando su uso y reduciendo costos asociados a certificaciones y pruebas.

Percepción del Mercado y Demanda.

- Retorno de inversión (ROI): Las empresas pueden ser reacias a invertir en materiales más costosos si no perciben un retorno de inversión claro o beneficios tangibles a corto plazo.
- Resistencia al cambio: La industria de la construcción tiende a ser conservadora, prefiriendo materiales y técnicas probadas, lo que dificulta la adopción de innovaciones más costosas.

Escasa Integración Multidisciplinaria. La implementación del biomimetismo exige una colaboración estrecha entre biólogos, ingenieros, arquitectos y otros expertos, pero esta colaboración es limitada. La falta de integración multidisciplinaria reduce la efectividad de las soluciones biomiméticas y dificulta su adopción en proyectos de construcción A continuación, se describen elementos fundamentales que demuestran esta vulnerabilidad.

Falta de Programas Educativos Integrados. Aunque existen iniciativas académicas que promueven la colaboración interdisciplinaria, como el curso diseño y biotecnología de la Universidad de los Andes, que reúne a estudiantes de diseño y ciencias para proyectos colaborativos, la participación conjunta de arquitectos, ingenieros civiles, biólogos e ingenieros agrónomos en proyectos de construcción sostenible es aún incipiente en el contexto colombiano (Preciado, 2024).

Limitada Participación de Biólogos en Proyectos de Construcción. La labor de los biólogos en la construcción de un acuerdo pacífico con la naturaleza es crucial, pero su participación en proyectos de construcción es limitada, lo que dificulta la incorporación de principios biomiméticos en el diseño y ejecución de obras.

Escasa Promoción de la Colaboración Interdisciplinaria. Las entrevistas con expertos del campo, como la efectuada a Sebastián Serna Hosie, subrayan la relevancia de la cooperación en la arquitectura, pero señalan que todavía es imprescindible promover una cultura de colaboración entre diversas disciplinas para la aplicación eficaz del biomimetismo (Baraya, 2024).

Enfoque Tradicional en el Costo Inmediato. Muchas empresas del sector construcción priorizan la reducción de costos y buscan soluciones de bajo costo a corto plazo. Este enfoque limita la disposición para invertir en biomimetismo, que puede implicar costos iniciales más altos antes de generar beneficios a largo plazo. Esto se debe a distintas razones que se exponen a continuación.

Existe una limitada comprensión de los beneficios económicos y ambientales que las prácticas sostenibles pueden ofrecer a largo plazo. La falta de estudios y datos que demuestren el retorno de inversión de soluciones biomiméticas dificulta que las empresas justifiquen los costos iniciales más elevados.

La industria de la construcción en Colombia muestra una tendencia conservadora, con una preferencia por métodos y materiales tradicionales. Esta resistencia al cambio dificulta la adopción de prácticas innovadoras que podrían implicar riesgos percibidos o desconocidos.

Procesos Internos y Metodologías Conservadoras. Los métodos y procesos constructivos en Colombia suelen adherirse a modelos convencionales y puede existir resistencia al cambio en ciertos sectores, la incapacidad para modificar métodos ya existentes puede hacer que la implementación del biomimetismo sea vista como un peso extra en vez de una ventaja competitiva.

En Colombia, principalmente se lleva a cabo de forma artesanal la edificación de estructuras de uno y dos pisos, donde los procesos clave se llevan a cabo en el trabajo, sin un diseño metodológico o un manual que facilite la estandarización y optimización de las técnicas de construcción (Perez, 2021).

Según Forero (2022) en su papel de líder de CAMACOL, el sector de la construcción e infraestructura en la nación ha mantenido su inalterabilidad durante décadas debido a la resistencia al cambio. Este enfoque hacia procesos internos y metodologías tradicionales constituye una barrera para la industria de la construcción en Colombia, pues restringe la implementación de prácticas innovadoras y sostenibles que podrían proporcionar ventajas considerables a largo plazo.

Infraestructura Limitada para Procesos de Manufactura de Biomateriales. Las instalaciones y equipos necesarios para desarrollar biomateriales innovadores están poco desarrollados en el país, la falta de infraestructura específica limita la capacidad de producción de materiales biomiméticos y puede aumentar los costos de importación. A continuación, se detallan elementos fundamentales que corroboran esta debilidad.

Capacidad Productiva Insuficiente. La producción de biomateriales en Colombia es aún incipiente, con una capacidad limitada para satisfacer la demanda del sector de la construcción, esto se debe a la falta de instalaciones especializadas y tecnología adecuada para la fabricación a gran escala de estos materiales.

Escasez de Centros de Investigación y Desarrollo. Aunque existen iniciativas académicas y proyectos piloto, como el desarrollo de un biomaterial a base de micelio y residuos madereros para la construcción, la cantidad de centros dedicados a la investigación y desarrollo de biomateriales es limitada, lo que restringe la innovación y la transferencia de tecnología al sector productivo (Alzate, 2023).

Limitada Colaboración entre Academia e Industria. Pese a los intentos de entidades académicas para crear biomateriales, la cooperación con el sector de la construcción es restringida y este desajuste

obstaculiza la puesta en marcha eficaz de innovaciones y la formación de una cadena de abastecimiento robusta para biomateriales.

Falta de Estándares Propios en Biomimetismo. No existen estándares nacionales específicos para guiar la aplicación del biomimetismo en la construcción, esto genera incertidumbre y reduce la cohesión en la aplicación de prácticas biomiméticas en distintos proyectos de construccion.

Actualmente, Colombia carece de regulaciones específicas que orienten la aplicación del biomimetismo en la construcción, aunque existen normativas generales sobre construcción sostenible, como la Norma Sismo Resistente (NSR-10) y las Normas Técnicas Colombianas (NTC), estas no abordan de manera explícita los principios y prácticas del biomimetismo.

La inexistencia de estándares técnicos propios para el diseño, fabricación y uso de materiales y estructuras biomiméticas genera incertidumbre en la industria, sin directrices claras, las empresas enfrentan desafíos para garantizar la calidad, seguridad y eficiencia de las soluciones biomiméticas.

Lo anterior se debe a la escasez de investigaciones y documentación sobre proyectos de construcción que incorporen biomimetismo en Colombia dificulta la creación de un marco normativo sólido, por lo que, la falta de estudios de caso y datos empíricos retrasa el desarrollo de estándares adaptados al contexto nacional.

Adicionalmente, ante la ausencia de estándares locales, las empresas que desean implementar biomimetismo deben recurrir a normativas internacionales, las cuales pueden no ajustarse completamente a las condiciones y necesidades específicas del país.

7.6 Matriz DOFA

Para esta investigación la matriz DOFA se construirá a partir del análisis detallado de los factores extenos expuestos en la matriz PESTEL, los cuales se clasifican como oportunidades y amenazas según su impacto en el sector. Paralelamente, se han identificado factores internos propios de la industria de la

construccion, los cuales se dividen en fortalezas y debilidades, evaluando elementos bajo el control directo de las empresas y la organización del sector en Colombia.

Este enfoque proporcionara una visión integral del contexto en el cual se busca aplicar el biomimetismo en la construcción colombiana, al resaltar tanto los elementos que impulsan su adopción representados en fortalezas y oportunidades, como aquellos que representan barreras representados por debilidades y amenazas.

Tabla 16

Matriz DOFA

	BENEFICIOS	LIMITACIONES
Factores internos	**Fortalezas**	**Debilidades**
	- Experiencia en construcción sostenible - Redes y colaboración académica - Capacidad de innovación y flexibilidad de la industria - Cultura organizacional de sustentabilidad - Creciente Interés por parte de clientes y stakeholders - Infraestructura en gestión de residuos	- Costos de materiales y tecnologías - Escasa integración multidisciplinaria - Enfoque tradicional en el costo inmediato - Procesos internos y metodologías conservadoras - Infraestructura Limitada para procesos de manufactura de biomateriales - Falta de estándares propios en biomimetismo
Factores externos	**Oportunidades**	**Amenazas**
	- Apoyo gubernamental para sostenibilidad - Iniciativas internacionales y tratados ambientales - Crecimiento económico y estabilidad macroeconómica - Disponibilidad de financiamiento e inversión - Conciencia ambiental y valores sostenibles - Influencia de las tendencias globales - Avances en tecnologías de construcción - Colaboración internacional y transferencia de tecnología - Biodiversidad y riqueza natural - Cambio climático y eventos climáticos extremos - Disponibilidad de recursos naturales - Propiedad intelectual y patentes	- Inestabilidad política - Políticas de importación - Competitividad y presión del mercado - Educación y conocimiento sobre sostenibilidad - Demografía y urbanización - Impacto de los medios de comunicación y redes sociales - Infraestructura tecnológica y acceso a herramientas digitales - Normativas de construcción sostenible - Regulaciones ambientales

Nota. Fuente: Elaboración propia.

7.7 Desarrollo de Estrategias y Recomendaciones

7.7.1 Estrategias para la Aplicación del Biomimetismo

El análisis literario de los estudios previos y casos de aplicación del biomimetismo en la construcción sugiere una serie de estrategias que pueden ser adaptadas a las condiciones del sector en Colombia, estas estrategias están orientadas a maximizar el uso de los principios biomiméticos en el diseño y construcción de edificaciones, promoviendo la durabilidad, la eficiencia energética y la reducción de residuos, como se detalló en las revisiones literarias de proyectos internacionales y locales.

Selección y Diseño de Materiales Bioinspirados. Para avanzar en la sostenibilidad de la construcción, es fundamental seleccionar y diseñar materiales que emulen estructuras naturales, los estudios han demostrado el potencial de los biocompuestos bioinspirados, como aquellos que imitan la estructura del nácar, que combina dureza y resistencia mediante la alternancia de capas duras y blandas. En términos prácticos, el uso de materiales inspirados en esta estructura podría mejorar significativamente la resistencia al impacto y la durabilidad de los materiales de construcción, este enfoque no solo es sostenible, sino también práctico para entornos que están sujetos a un alto desgaste o condiciones climáticas extremas.

Adicionalmente, los materiales autorreparables, basados en procesos biológicos como la regeneración de huesos, brindan ventajas económicas a largo plazo al disminuir las necesidades de mantenimiento en las construcciones. En Colombia, donde diversos climas impactan la solidez estructural de las construcciones de formas diversas, estos materiales podrían ofrecer durabilidad en distintas condiciones ambientales, puesto que, su aplicación no solo respaldaría la prolongación de la durabilidad de los edificios, sino que también disminuiría los gastos de mantenimiento a lo largo del tiempo, contribuyendo a metas tanto económicas como medioambientales.

Diseño de Envolventes Adaptativas para Eficiencia Energética. El concepto de envolventes adaptativas está inspirado en organismos como los cactus, que se expanden y contraen para almacenar o

liberar agua, o los reptiles, que cambian de color para regular su temperatura. En la construcción, esto da como resultado fachadas de edificios que responden dinámicamente a la temperatura y la luz exteriores, controlando el ambiente interior sin necesidad de intervención mecánica. Por ejemplo, los termobimetales son materiales que se doblan en respuesta a los cambios de temperatura y podrían usarse en sistemas de protección de ventanas para minimizar la ganancia de calor en climas cálidos y maximizar la ganancia de calor en climas fríos.

Para Colombia, donde las temperaturas varían significativamente entre regiones, las estrategias de envoltura adaptativa ofrecen una solución ideal para reducir la demanda de energía asociada con el aire acondicionado. La implementación de estos sistemas puede reducir significativamente el consumo de energía en los edificios, especialmente en los centros urbanos donde los costos energéticos son altos, proporcionando una solución práctica para mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones de carbono.

Optimización de la Gestión de Residuos e Integración de la Economía Circular. La implementación de un enfoque de economía circular en la construcción podría cambiar fundamentalmente las prácticas de gestión de residuos al transformar subproductos en recursos valiosos, distintos residuos como los residuos de vidrio, cerámicas y plásticos pueden reutilizarse en materiales compuestos o ladrillos para construcción, lo que no solo minimiza el impacto ambiental, sino que también cumple con los estándares de resistencia estructural. En este sentido, se recomienda fomentar la integración de materiales reciclados en los proyectos de construcción, aprovechando el modelo de economía circular para cerrar el ciclo de vida de los materiales y reducir significativamente los residuos generados en obra.

En Colombia, donde las regulaciones sobre disposición de residuos son cada vez más estrictas, esta estrategia puede reducir la dependencia de la eliminación tradicional de residuos y permitir que las empresas cumplan con los estándares ambientales con mayor facilidad, al integrar prácticas de

economía circular también podría generar ahorros económicos al reducir las tarifas de vertedero y los costos de materiales, alineando los procesos de construcción con los objetivos de sostenibilidad y protección ambiental del país.

Sistemas de Construcción Modular Inspirados en Estructuras Naturales. La construcción modular, inspirada en los bloques de construcción de la naturaleza, como los arrecifes de coral o los montículos de termitas que forman estructuras interconectadas, ofrece una solución flexible y sostenible para el desarrollo urbano, estos sistemas modulares permiten que los edificios se ensamblen, desmonten y modifiquen de manera sencilla, reduciendo residuos y facilitando la reutilización adaptativa. Al diseñar componentes modulares que se ensamblen sin problemas, la construcción puede completarse de forma más rápida y con menor impacto ambiental, brindando un proceso de construcción más sostenible.

En Colombia, donde los espacios urbanos son cada vez más densos, la construcción modular permite un uso eficiente del suelo y flexibilidad en el diseño, haciendo más fácil satisfacer la demanda de vivienda de forma sostenible. Las estructuras modulares también facilitan la reutilización de componentes, alineándose con los principios de economía circular y reduciendo significativamente los residuos de demolición.

7.7.2 Estrategias para Potenciar las Fortalezas

Aprovechamiento de la Biodiversidad Local. Colombia es hogar de una biodiversidad única, que ofrece una fuente directa de inspiración para soluciones de diseño en construcción, esto significa que los materiales y estructuras pueden inspirarse en especies locales que han desarrollado adaptaciones naturales a las condiciones climáticas de la región, aumentando así la durabilidad. y sostenibilidad de los materiales y la construcción.

Se recomienda desarrollar proyectos de investigación con universidades y centros científicos que estudien la adaptabilidad de especies nativas cuyos resultados podrían ser aplicados en el diseño de

materiales con características de resistencia y durabilidad, como muros inspirados en estructuras alveolares o basados en sistemas de regulación térmica como en la piel de reptiles locales.

Fortalecimiento la Innovación Académica y Tecnológica. La base académica y los recursos de investigación en Colombia son sólidos, y las universidades tienen la capacidad de liderar proyectos innovadores de biomimetismo, integrar esta temática en programas de formación e investigación permitiría una adopción más rápida y efectiva en el sector.

Crear alianzas estratégicas entre universidades, centros de investigación y empresas del sector de la construcción para financiar tesis y proyectos sobre construcción bioinspirada es un aspecto clave en la adopción de prácticas biomiméticas, adicionalmente se pueden desarrollar más diplomados y especializaciones que capaciten a los futuros profesionales en biomimetismo y sostenibilidad en construcción.

Creación de un Centro de Innovación en Biomimetismo Aplicado a la Construcción. Dado el alto potencial de biodiversidad y el talento académico en el país, un centro especializado en biomimetismo permitiría consolidar investigaciones, experimentos y desarrollos tecnológicos en un solo espacio, facilitando el avance de soluciones bioinspiradas. Este centro podría funcionar como un punto de colaboración entre universidades, empresas y el gobierno, promoviendo la investigación de materiales sostenibles y diseños adaptativos inspirados en especies locales. Además, el centro serviría para capacitar a profesionales en el uso de tecnologías biomiméticas, realizar pruebas de materiales en entornos controlados y divulgar resultados que impulsen su aplicación en proyectos de construcción a lo largo del país.

7.7.3 Estrategias para Mitigar las Debilidades

Desarrollo de Proyectos Piloto con Apoyo Gubernamental y Privado. La falta de ejemplos prácticos y demostraciones en el contexto colombiano limita la confianza en las prácticas biomiméticas. La falta de ejemplos prácticos limita la confianza en estas prácticas, especialmente en el contexto local.

Mediante proyectos piloto en colaboración con el gobierno, universidades y el sector privado, se puede demostrar cómo los principios biomiméticos pueden aplicarse eficazmente en construcciones de pequeña y mediana escala. Implementar estos proyectos en áreas urbanas y rurales permitiría evidenciar la adaptabilidad de las soluciones bioinspiradas en distintos entornos. Además, documentar y divulgar los resultados, destacando logros en sostenibilidad, eficiencia energética y reducción de costos a largo plazo, fortalecería la confianza en el biomimetismo, inspirando a otros actores del sector a adoptar estas innovaciones en futuros proyectos.

Reducción de los Altos Costos Iniciales. El costo de materiales y tecnologías bioinspiradas suele ser elevado pero los beneficios económicos a largo plazo de estos proyectos, como la eficiencia energética y el bajo mantenimiento, justifican la inversión inicial.

Se recomienda que el gobierno desarrolle incentivos fiscales para empresas que adopten biomimetismo en sus proyectos, adicionalmente, que las empresas establezcan alianzas con centros de investigación locales lo cual permitiría que los materiales bioinspirados se adapten mejor a las necesidades y condiciones del entorno colombiano, logrando una cadena de suministro más accesible y económica.

Establecer Programas de Asesoría y Acompañamiento Técnico. Muchas compañías pueden sentirse inseguras respecto a cómo integrar principios bioinspirados en sus proyectos debido a la falta de experiencia y conocimientos técnicos en este ámbito. Para abordar esta limitación, se recomienda desarrollar programas de asesoría en los que expertos en biomimetismo y sostenibilidad acompañen a las empresas durante las fases de diseño y construcción, ofreciendo recomendaciones técnicas y ayudando a identificar materiales y procesos apropiados. Además, estos programas podrían incluir talleres y capacitaciones específicas, lo cual fortalecería las competencias del equipo y facilitaría la transición hacia prácticas de construcción bioinspiradas.

7.7.4 Estrategias para Aprovechar las Oportunidades

Alineación con Tendencias Globales de Sostenibilidad. La adopción de certificaciones reconocidas, como LEED o EDGE, no solo aumenta la competitividad del sector en Colombia, sino que también posiciona al país como un líder en innovación y sostenibilidad en la región, por ende, al incentivar a las empresas para que obtengan estas certificaciones fortalecería su reputación a nivel internacional, mostrando su compromiso con prácticas ambientales responsables.

Además, promover la creación de certificaciones locales que incluyan criterios de biomimetismo mejoraría aún más la imagen del sector, atrayendo inversión extranjera y fomentando el desarrollo de proyectos de construcción bioinspirados y sostenibles**.**

Adaptar Normativas Locales. Actualizar las normativas para integrar el biomimetismo puede impulsar la innovación en el sector y promover la sostenibilidad en el entorno construido. Para lograrlo, se sugiere colaborar con entidades gubernamentales y proponer cambios específicos en la regulación de construcción sostenible que incluyan principios de biomimetismo. Adicionalmente, organizar foros y talleres con expertos en sostenibilidad y normativas ayudaría a desarrollar un marco regulatorio actualizado, promoviendo así la adopción de prácticas de construcción biomimética en Colombia.

Desarrollar Programas de Divulgación y Sensibilización Sobre los Beneficios del Biomimetismo en la Construcción Sostenible. Aumentar la conciencia y comprensión sobre el biomimetismo entre profesionales del sector, inversionistas y la sociedad en general puede facilitar su adopción y aceptación, estos programas de divulgación pueden incluir campañas informativas, seminarios y talleres que presenten casos de éxito y datos concretos sobre el impacto positivo de la bioinspiración en términos de durabilidad, eficiencia energética y reducción de residuos.

Al demostrar los beneficios tangibles del biomimetismo, se generará un mayor interés en su implementación, atrayendo tanto a empresas como a instituciones gubernamentales para que apoyen y financien proyectos de construcción bioinspirada en Colombia.

7.7.5 Estrategias para Contrarrestar las Amenazas

Superación de la Resistencia al Cambio en el Sector. Esta estrategia puede ser vital para fomentar la aceptación del biomimetismo, especialmente dado que esta industria suele inclinarse hacia métodos tradicionales, para facilitar esta transición, es fundamental demostrar los beneficios tangibles de las prácticas bioinspiradas.

Una estrategia valida es reconocer y premiar a las empresas o proyectos que implementen prácticas bioinspiradas exitosamente en la construcción puede motivar a otros a seguir el ejemplo. Estos incentivos pueden incluir premios de sostenibilidad, certificaciones especiales, o incluso beneficios fiscales para los proyectos destacados en biomimetismo. Además, realizar eventos de premiación o reconocimiento público aumenta la visibilidad de estos proyectos pioneros, promoviendo el prestigio de las empresas y generando un efecto positivo en la percepción del biomimetismo como una práctica innovadora y valiosa en el sector de la construcción.

Creación de un Fondo de Contingencia Para la Innovación del Biomimetismo en la Construcción. Este fondo funcionaría como un respaldo económico para proyectos que enfrentan dificultades inesperadas debido a cambios regulatorios, fluctuaciones en los costos de materiales o falta de infraestructura tecnológica adecuada. Al contar con un fondo de contingencia específico, los proyectos de biomimetismo podrían acceder a financiamiento adicional en situaciones de riesgo, asegurando la continuidad de la innovación sin comprometer la viabilidad económica del proyecto.

Además, este fondo también podría destinarse a superar barreras de implementación, facilitando el acceso a materiales especializados, tecnologías emergentes o asesoría técnica, garantizando así la resiliencia y sostenibilidad de las iniciativas bioinspiradas en el sector de la construcción.

8. Conclusiones

La revisión literaria sobre materiales biomiméticos demuestra su impacto tanto en la durabilidad de las estructuras como en la eficiencia energética y reducción de residuos en la construcción. Un ejemplo destacado es el concreto autorreparable, que, mediante la inclusión de bacterias Bacillus cohnii, permite sellar fisuras de hasta 125 µm, evitando que se conviertan en problemas estructurales mayores y prolongando la vida útil del material entre un 20 % y un 30 % en comparación con el concreto convencional (Sierra et al., 2016). La resistencia a la compresión también desempeña un papel fundamental en la durabilidad, ya que, a mayor resistencia, el concreto presenta menor porosidad, limitando la entrada de agentes agresivos y protegiendo sus componentes internos. Existe una relación inversamente proporcional entre porosidad y resistencia a la compresión, como señalan León y García (2022), lo que subraya la importancia de este parámetro en la longevidad y protección de las estructuras frente a condiciones ambientales adversas. Además, los muros inspirados en estructuras naturales incrementan su tenacidad, permitiéndoles soportar cargas parciales después de la fractura, una característica particularmente valiosa en zonas sísmicas debido a la frecuencia de réplicas tras los eventos principales. Este comportamiento resiliente refuerza tanto la seguridad como la durabilidad de las construcciones.

Los diseños de envolventes en edificaciones han alcanzado avances significativos en eficiencia energética y sostenibilidad. Estudios recientes, como el de Öztürk et al. (2024), revelan que las fachadas inspiradas en el comportamiento de las termitas pueden reducir la carga de calefacción y refrigeración hasta en un 32 %, lo que contribuye significativamente a la eficiencia energética del edificio. Además, la incorporación de materiales fotocatalíticos en estas fachadas descompone contaminantes atmosféricos, minimizando la acumulación de sustancias nocivas en las superficies y mejorando la calidad del entorno. Un factor crucial para alcanzar este nivel de eficiencia energética es el uso de materiales con bajos valores de conductividad térmica (λ) y transmitancia térmica (U), los cuales limitan la transferencia de

calor y favorecen la regulación térmica interna. Estos resultados sugieren que los diseños inspirados en la naturaleza pueden adaptarse exitosamente al contexto colombiano, generando edificaciones con menor dependencia de sistemas de climatización artificial y optimizando los recursos energéticos.

En términos de reducción de residuos, el uso de ladrillos fabricados con residuos de vidrio y plástico, inspirados en las estructuras de caparazones de moluscos, ha alcanzado una resistencia a la compresión de hasta 18,08 MPa, superando las normativas colombianas NTC 4205. Estos ladrillos no solo disminuyen en un 30 % las emisiones de CO_2 asociadas a la construcción, sino que también optimizan la gestión de residuos mediante la reutilización de desechos industriales (Cardona et al., 2020). Esta solución biomimética tiene un gran potencial para contribuir a la economía circular en Colombia, reduciendo la extracción de materiales naturales y fomentando la sostenibilidad en el sector.

El análisis DOFA reveló que, si bien existen barreras significativas para la implementación del biomimetismo en Colombia, también hay múltiples oportunidades que posicionan al país de manera favorable para adoptar este enfoque. La diversidad biológica y climática de Colombia se destaca como una de las fortalezas clave, ya que ofrece una rica fuente de inspiración para desarrollar soluciones biomiméticas adaptadas a diversos entornos. Por ejemplo, la aplicación de conceptos basados en la resiliencia de organismos tropicales podría mejorar la resistencia de materiales frente a la alta humedad y temperaturas variables presentes en varias regiones del país.

Sin embargo, la falta de regulaciones específicas y de incentivos para proyectos sostenibles constituye una debilidad notable, limitando el interés y la inversión en estas tecnologías. Además, el desconocimiento generalizado sobre el biomimetismo en el sector de la construcción y los altos costos iniciales asociados a la investigación y desarrollo de soluciones biomiméticas representan una amenaza para su implementacion. Por otro lado, la implementación del biomimetismo puede reducir hasta un 40% el consumo energético en la construcción y contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) del país (Guía de Materiales para la Construcción Sostenible, 2022). El

análisis demostró que, para maximizar estas oportunidades, es esencial crear incentivos y fomentar la educación sobre el potencial del biomimetismo, lo cual podría catalizar una transformación hacia prácticas más sostenibles en la industria.

Con base en los hallazgos de la revisión bibliográfica y el análisis DOFA, se formularon recomendaciones específicas para promover la adopción del biomimetismo en la construcción colombiana. Una de las principales estrategias incluye el desarrollo de políticas que incentiven la investigación y el uso de tecnologías bioinspiradas. En otros países, programas de certificación ambiental, como LEED, han demostrado ser eficaces en la promoción de prácticas sostenibles; por lo tanto, implementar programas similares en Colombia podría estimular el interés en el biomimetismo y fomentar prácticas constructivas más respetuosas con el medio ambiente.

Asimismo, la capacitación en conceptos biomiméticos dirigida a profesionales de la construcción, tales como ingenieros, arquitectos y constructores, es fundamental para asegurar una correcta aplicación de estas tecnologías. La creación de alianzas interdisciplinarias entre biólogos, ingenieros y arquitectos es igualmente importante para maximizar el potencial innovador del biomimetismo en el diseño de materiales y edificaciones. Estas colaboraciones facilitarían el desarrollo de soluciones específicas para el contexto colombiano, como sistemas de captura de agua inspirados en plantas adaptadas a climas áridos, optimizando el recurso hídrico en edificaciones ubicadas en regiones de alta sequía. Además, se recomendó la creación de programas piloto en zonas urbanas y rurales para evaluar la viabilidad y adaptabilidad de soluciones biomiméticas, permitiendo el monitoreo y ajuste de estas tecnologías según las necesidades del país.

En definitiva, la adopción del biomimetismo en Colombia tiene un potencial significativo para mejorar la sostenibilidad y eficiencia de la industria de la construcción. Sin embargo, para que este enfoque logre un impacto amplio, es esencial contar con el respaldo de políticas adecuadas, capacitación especializada y una mayor difusión de los beneficios del biomimetismo en el sector. La implementación

de estas recomendaciones facilitaría una transición hacia prácticas constructivas sostenibles, fortaleciendo la resiliencia y sostenibilidad de las edificaciones en Colombia.

Referencias

ACIS. (s. f.). Tecnología BIM, la nueva era de la construcción en Colombia. https://acis.org.co/portal/content/tecnolog%C3%ADa-bim-la-nueva-era-de-la-construcci%C3%B3n-en-colombia

Admin. (2024, 10 septiembre). *Tecnologías de construcción: 5 tendencias en 2024 - Metecno Colombia*. Metecno Colombia. https://metecnocolombia.com/tecnologias-de-construccion-5-tendencias-en-2024/

Agencia Presidencial de Cooperación Internacional. (2021). Nuevo programa de cooperación técnica y científica entre Colombia y México. https://www.apccolombia.gov.co/comunicaciones/noticias/nuevo-programa-de-cooperacion-tecnica-y-cientifica-entre-colombia-y-mexico

AlAli, M., Mattar, Y., Alzaim, M. A., & Beheiry, S. (2023). Applications of biomimicry in architecture, construction and civil engineering. *Biomimetics*, *8(2), 202.* https://doi.org/10.3390/biomimetics8020202

Alzate Restrepo, J. (2023). *Desarrollo de biomaterial a base de micelio y residuos madereros para el campo de la construcción* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Facultad de Arquitectura, Escuela de Construcción, Medellín.

Argos. (2024). Conoce las tendencias 2024 para la industria de la construcción. Cementos Argos Colombia. https://colombia.argos.co/conoce-las-tendencias-2024-para-la-industria-de-la-construccion/

Ayala-García, J., & Ospino-Ramos, K. (2023). Desastres naturales en Colombia: un análisis regional (Núm. 317). Banco de la República, Cartagena.

Balila, A., & Vahdati, M. (2024). Biomimicry in construction: Glycoprotein-stabilised adobe bricks for enhanced compressive strength inspired by termites mounds. *Construction And Building Materials*, *438, 137077*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137077

Ballen, J. L. y. G. (2022, 27 mayo). *Gusanos de seda, ¿el futuro de la construcción sustentable en Colombia?* ArchDaily Colombia. https://www.archdaily.co/co/956831/gusanos-de-seda-el-futuro-de-la-construccion-sustentable-en-colombia

Baraya, S. (2024, 7 marzo). *Sebastián Serna Hosie: «La buena arquitectura tiene que ver sobre cómo va a funcionar para los próximos que la habiten»*. ArchDaily Colombia. https://www.archdaily.co/co/961635/sebastian-serna-hosie-la-buena-arquitectura-tiene-que-ver-con-como-va-a-funcionar-un-proyecto-en-su-futuro-para-los-seres-humanos-que-van-a-habitar-el-lugar

BBVA. (2024, 2 noviembre). *Credito Construccion sostenible | Empresas | BBVA Colombia*. https://www.bbva.com.co/empresas/productos/prestamos/constructor/profesional-sostenible.html

Beltran, G. S., Ortiz, W. M., & Jonkers, H. M. (2017). Hormigón autoRreparable con bacterias y reforzado con fibras naturales: Principios y aplicaciones en Ecuador. *Alternativas*, *17(3), 207-214*. https://doi.org/10.23878/alternativas.v17i3.229

Bioluminiscencia: qué es y ejemplos. (s. f.). https://ecologiayvida.com/bioluminiscencia-que-es-y-ejemplos-169

Büşra, Ö., Güneş, M., Semra, A. (2024). Mejora de la eficiencia energética en fachadas de vidrio mediante estrategias de diseño biomimético*. Revista Hábitat Sustentable Vol. 14*, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 34 -43 https://doi.org/10.22320/07190700.2024.14.01.03

Cámara Colombiana de la Construcción – CAMACOL. (2024). Avanzando hacia la circularidad en el sector de la construcción en Colombia: Diagnóstico de prácticas de economía circular y manejo de RCD en Colombia. Mesa de Construcción Sostenible Colombia-Suiza.

Cervera, M., & Blanco, E. (2015). Resistencia de Materiales.

Chamorro, M. C. (2022, 22 agosto). Edificaciones verdes en Colombia: avances y retos de la legislación. *www.eluniversal.com.co*. https://www.eluniversal.com.co/especial/construccion/2022/08/22/edificaciones-verdes-en-colombia-avances-y-retos-de-la-legislacion/

Chan Collí, D. G. (2022). *Generación de un material compuesto biomimético usando simulaciones computacionales con el método de los elementos finitos* [Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.]. Posgrado en Materiales Poliméricos, Mérida, Yucatán, México

Chapman, A. J. (2006). Transmisión del Calor (3ª ed.).

Chaves, M.E. y Santamaría, M. (eds). 2006. Informe Nacional sobre el Avance en el Conocimiento y la Información de la Biodiversidad 1998-2004. Instituto de Investigación en Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá D.C. Colombia.Tomo 2, p.33.

Consejo Colombiano de Construcción Sostenible – CCCS. (2024). Estado de la construcción sostenible en Colombia. Segunda edición. Bogotá: CCCS.

Crédito Construcción Sostenible | Grupo Bancolombia. (s. f.). Bancolombia. https://www.grupobancolombia.com/sostenibilidad/enfoque-sostenible/clientes/financiacion-sostenible/credito-constructor

Crédito constructor sostenible - bancodebogota.com. (s. f.). bancodebogota.com. https://www.bancodebogota.com/empresas/productos-de-credito/creditos-sostenibles/credito-constructor-sostenible

Cruz, E., Raskin, K., & Aujard, F. (2017). Biomimetic solutions to design multi-functional envelopes. *Conference Paper*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/340982980

Dianadmms. (2022, 12 octubre). *Importación - Aduanas y comercio exterior*. Aduanas y Comercio Exterior. https://micrositios.dian.gov.co/aduanas-y-comercio-exterior/importacion/

Diseño inspirado en la naturaleza. (2022). Uniandes. https://ingbiomedica.uniandes.edu.co/es/programas/escuela-verano/diseno-inspirado-en-la-naturaleza

En Colombia, las políticas públicas y la inversión del sector privado convirtieron al país en líder en construcción verde: IFC. (s. f.). Camacol - Cámara Colombiana de la Construcción. https://camacol.co/prensa/noticias/en-colombia-las-politicas-publicas-y-la-inversion-del-sector-privado-convirtieron

Escalante, J. B., Nielsen, D. S., Escalante, S. B., Mora, A. C., & Casilimas, J. B. (2020). Propuesta de diseño de una vivienda rural sostenible bio inspirada para el municipio de Paipa, Boyacá-Colombia. *Arquitecno*, *16, 27*. https://doi.org/10.30972/arq.0164550

Espiga Lisbona García, L. (2016). *Materiales fotocatalíticos y sus aplicaciones en construcción* [Trabajo final de máster, Universidad de Cataluña].

Estévez, A. T., & Abdallah, Y. K. (2022). The New Standard Is Biodigital: Durable and Elastic 3D-Printed Biodigital Clay Bricks. *Biomimetics*, *7*(4), 159. https://doi.org/10.3390/biomimetics7040159

Estudios económicos de la OCDE: Colombia 2024. (2024, 17 septiembre). OECD. https://www.oecd.org/es/publications/estudios-economicos-de-la-ocde-colombia-2024_e61e16ad-es.html

Fernández, N., Gaggino, R., Positieri, M. J., & Kreiker, J. (2020). Materiales biopoliméricos desarrollados a partir de micelio y residuos lignocelulósicos. Estado de la técnica actual y perspectivas de aplicación en el campo del hábitat. *AJEA*, *5*. https://doi.org/10.33414/ajea.5.774.2020

Franco, J. C. (2024, 26 septiembre). *Importancia de la transferencia de tecnología en Colombia*. OCH Group Colombia. https://www.ochgroup.co/importancia-de-la-transferencia-de-tecnologia-en-colombia/

Galeondev. (2022, 9 marzo). *Qué es la ventilación pasiva*. Okohaus. https://okohaus.es/que-es-la-ventilacion-pasiva/

García Barreto, N. A. (2020*). Primordiales problemas de la durabilidad del concreto: Una revisión general* [Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás, Facultad de Ingeniería Civil]. Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

Gerrard, N. (2023, 30 de marzo). ¿El concreto autorreparable jugará alguna vez un papel importante en la construcción? Construcción LatinoAmericana.

Gupta, S., Esmaeeli, H. S., & Moini, R. (2024). Tough and Ductile Architected Nacre-Like Cementitious Composites. *Advanced Functional Materials*. https://doi.org/10.1002/adfm.202313516

Hernández, P. J. (2014, 26 marzo). CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DE LOS MATERIALES. ARQUITECTURA EFICIENTE. https://pedrojhernandez.com/2014/04/09/caracteristicas-termicas-de-los-materiales/

Howard, F. S. C., Rojas, L. A. R., Martínez, J. F. G., Castro, D. G. M., & Pérez, O. F. A. (2021). Evaluación de las propiedades mecánicas de ladrillos elaborados con residuos de vidrio y plástico. Análisis de las emisiones de dióxido de carbono. *Lámpsakos*, *24*, 60. https://doi.org/10.21501/21454086.3725

Hyde, R. (2023). Site-Specific Bioinspired Architecture—A Case Study of the Allen–Lambe House by Frank Lloyd Wright: The Pragmatic versus the Naturalistic, Intent versus Realization. *Biomimetics*, *8*(2), 178. https://doi.org/10.3390/biomimetics8020178

ifeder. (2022, 31 octubre). *Corrientes de convección*. Lifeder. https://www.lifeder.com/corrientes-de-conveccion/

Jamei, E., & Vrcelj, Z. (2021). Biomimicry and the built environment: Learning from nature's solutions. *Applied Sciences*, 11(16), 7514. https://doi.org/10.3390/app11167514

Kamińska, P., & Michalak, H. (2022). Innovative, Modular Building Facades - as a Tool to Counteract The Effects of and to Prevent Climate Change. *Civil And Environmental Engineering Reports*, *32*(4), 184-209. https://doi.org/10.2478/ceer-2022-0052

Kanyilmaz, A., Berto, F., Paoletti, I., Caringal, R. J., & Mora, S. (2020). Nature-inspired optimization of tubular joints for metal 3D printing. *Structural And Multidisciplinary Optimization*, *63*(2), 767-787. https://doi.org/10.1007/s00158-020-02729-7

Kiakojouri, F., De Biagi, V., & Abbracciavento, L. (2023). Design for Robustness: Bio-Inspired Perspectives in Structural Engineering. *Biomimetics*, 8(1), 95. https://doi.org/10.3390/biomimetics8010095

La sostenibilidad en la construcción, tema de análisis en Camacol Verde. (2023). Camacol - Cámara Colombiana de la Construcción. https://camacol.co/actualidad/publicaciones/revista-urbana/96/sostenibilidad/la-sostenibilidad-en-la-construccion-tema

León Consuegra, L., & Rodríguez García, C. (2022). Factores que influyen en la resistencia a la compresión del hormigón. Estado del arte. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 16(3). https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193972950003

Luis. (2024, 27 febrero). *¿Qué son los materiales Fotocatalíticos?* GRACCO SURFACE. https://gracco.es/que-son-los-materiales-fotocataliticos/

Maat. (2022, 20 noviembre). ¿Cómo cumplir con la Resolución 472 de 2017 en los proyectos de construcción en Colombia? Maat. https://www.maat.com.co/cumplir-la-resolucion-472-2017-proyectos-construccion-colombia/

Magno Concretos. (2024, 19 de marzo). La resiliencia del concreto ecológico: Construyendo un futuro sostenible. https://magnoconcretos.com/2024/03/19/la-resiliencia-del-concreto-ecologico-construyendo-un-futuro-sostenible/.

Mahecha, C. A. G. (2024, 23 octubre). Esto es lo que crecerá la economía colombiana en 2024, según las nuevas proyecciones del Fondo Monetario Internacional. *El Tiempo*. https://www.eltiempo.com/economia/sectores/el-fmi-eleva-proyeccion-de-crecimiento-de-la-economia-colombiana-a-1-6-para-el-2024-desde-el-1-1-previsto-en-su-ultima-revision-3392614

Materiales termorreguladores con capacidad de regular su temperatura. (2024, 9 enero). Suministro y Venta de Aislamientos Para la Construcción y Embalajes. https://www.polyfex-eps.com/materiales-termorreguladores/#:~:text=En%20general%2C%20los%20materiales%20termorreguladores,control%20eficiente%20de%20la%20temperatura

Medina Gonzalez, J. A., & Moreno Cruz, J. L. (2018). *Influencia de las piedras fotoluminiscentes en la iluminación y las propiedades mecánicas del concreto, Trujillo – 2018* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Trujillo]. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Trujillo.

Mena Osorio, M. J. (2021). *Estudio de muros aligerados con un diseño basado en la estructura de la concha nácar para aplicaciones en zonas sísmicas* [Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.].

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2015). Decreto 1285 de 2015, por el cual se modifica el Decreto 1077 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio, en lo relacionado con los lineamientos de construcción sostenible para edificaciones. Diario Oficial.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2021). Resolución 1026 de 2021, por medio de la cual se modifica la Resolución 463 de 2017, relacionada con el Formulario Único Nacional para la

solicitud de licencias urbanísticas y el reconocimiento de edificaciones y otros documentos. Diario Oficial.

Molina, N. F., Mendoza, K. J., Añez, R. O., & Marulanda, W. U. (2021). Aprovechamiento sostenible de residuos poliméricos como agregados del concreto: una revisión. *Interciencia*, *46(6),* 240-247. https://www.interciencia.net/wp-content/uploads/2021/07/01_6813_A_Fuentes_v46n6_8.pdf

Mora Chaves, N. M. (2021). La lucha contra el cambio climático a través de las redes sociales: actualidad, perspectivas y retos en Colombia. Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD.

Muesmann, A. (2020, 12 marzo). *Qué nos cuentan los materiales autorreparables*. Sociemat. https://sociemat.es/materiales-autorreparables/

National Geographic España. (2024, 1 noviembre). National Geographic. https://www.nationalgeographicla.com/medio-ambiente/que-es-huella-de-carbono-como-se-mide

Orduz, M. C. (2022, 5 julio). En el último siglo la temperatura promedio de Colombia aumentó 1 °C. *El Tiempo*. https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/cambio-climatico-efectos-del-calentamiento-global-en-colombia-684722

Pacto Global Red Colombia (s. f.). ¿Cómo implementar una cultura sostenible en la organización y no morir en el intento?. https://www.pactoglobal-colombia.org/433-como-implementar-una-cultura-sostenible-en-la-organizacion-y-no-morir-en-el-intento.html

Palomo Cano, M. (2017). Aislantes térmicos. Criterios de selección por requisitos energéticos [Trabajo de fin de grado, Universidad Politécnica de Madrid].

Pérez Tovar, S. (2021). *Análisis comparativo del proceso constructivo de casas prefabricadas y convencionales de uno y dos pisos en Colombia* [Monografía de pregrado, Universidad Santo Tomás]. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, Villavicencio.

Pérez, E. (2024, 25 abril). *Tenacidad en materiales: Definición, ejemplos y propiedades específicas*. Saberpedia. https://saberpedia.com/que-es-tenacidad-y-un-ejemplo/

Piñeiro Lago, M. (2015). Arquitectura bioclimática: Consecuencias en el lenguaje arquitectónico [Trabajo de fin de grado, Universidade da Coruña].

Preciado., J. (2024, 1 octubre). Diseño y biotecnología: maridaje vital - Era 2048 | Universidad de los Andes. Era 2048 | Universidad de los Andes. https://era2048.uniandes.edu.co/diseno-y-biotecnologia-maridaje-vital/

Productos que no se pueden importar a Colombia: Guía de restricciones e. (2024, 25 agosto). https://www.clmcargo.com/es-co/importar/productos-que-no-se-pueden-importar-a-colombia

R, J. (2023, 18 octubre). *Tecnología BIM, la nueva era de la construcción en Colombia*. Colombia PropTech. https://colombiaproptech.com/tecnologia-bim-la-nueva-era-de-la-construccion-en-colombia/

Rivera Moncada, S. C. (2023). *Biomímesis espacial: Análisis de la planta Totora y su vinculación con la arquitectura* [Trabajo final de máster, Universitat Politècnica de València]. Escuela Técnica Superior de Arquitectura.

Rogers, A., Yoon, B., & Malek, C. (2008). Beijing Olympic Stadium 2008 as Biomimicry of a Bird's Nest. *Architectural Structures*, ARCH 251.

Roldán Cedeño, L. R., Vanga Arvelo, M. G., & Ortega Bravo, B. H. (2023). Enfoque biomimético aplicado al diseño de una vivienda unifamiliar en Portoviejo. *Dom. Cien.*, *9(3), 1880-1917*. https://doi.org/10.23857/dc.v9i3.3533

Rotondo, L. M. B., & Barbat, A. H. B. (2020). *Diseño sismorresistente de edificios: Técnicas convencionales y avanzadas*. Reverte.

Sede Electronica. (s. f.). Consulta de patentes y diseños industriales presentados. https://sedeelectronica.sic.gov.co/temas/propiedad-industrial/cigepi/herramientas/buscador-de-patentes

She, W., Wu, Z., Yang, J., Pan, H., Du, F., Du, Z., & Miao, C. (2024). Cement-based biomimetic metamaterials. *Journal Of Building Engineering*, *94, 110050.* https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110050

Solís-Carcaño, R. G., & Alcocer-Fraga, M. A. (2019). Durabilidad del concreto con agregados de alta absorción*. Ingeniería Investigación y Tecnología*, *(4), 1-13*. https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n4.039

Sostenibilidad y cambio climático en los medios de comunicación. (2023, 12 diciembre). Rebold. https://letsrebold.com/es/blog/sostenibilidad-ambiental-y-cambio-climatico-en-medios-de-comunicacion/

Stelzer, L., Hoberg, F., Bach, V., Schmidt, B., Pfeiffer, S., Meyer, V., & Finkbeiner, M. (2021). Life cycle assessment of fungal-based composite bricks. *Sustainability (Switzerland), 13(21).* https://doi.org/10.3390/su132111573

Technology, S. (2024, 27 febrero). Aprende a medir el rendimiento del aislamiento térmico. https://blog.synthesia.com/es/aprende-a-medir-el-rendimiento-del-aislamiento-termico

Tendencias tecnológicas aplicadas a la construcción en Colombia. (s. f.). Coninsa Nuestro Blog. https://blog.coninsa.co/arquitectura-y-grandes-obras/tendencias-tecnologicas-aplicadas-la-construccion-en-colombia

Valenzuela Paredes, M. R. (2014). *Investigación de las necesidades de financiamiento del sector de construcción civil a través de titularización* (Trabajo de grado para la obtención del título de Magíster en Auditoría y Finanzas). Universidad Tecnológica Equinoccial, Dirección General de Posgrados, Quito, Ecuador.

Verbrugghe, N., Rubinacci, E., & Khan, A. Z. (2023). Biomimicry in architecture: A review of definitions, case studies, and design methods. *Biomimetics*, *8(1), 107.* https://doi.org/10.3390/biomimetics8010107

Wang, S., & Xia, H. (2023). Protective Behaviors of Bio-Inspired Honeycomb Column Thin-Walled Structure against RC Slab under Impact Loading. *Biomimetics*, *8(1), 73.* https://doi.org/10.3390/biomimetics8010073

Wang, S., Wang, J., & Komvopoulos, K. (2023). Mechanical Behavior of Bamboo-Like Structures under Transversal Compressive Loading. *Biomimetics*, *8(1), 103.* https://doi.org/10.3390/biomimetics8010103

Webb, M. (2021). Biomimetic building facades demonstrate potential to reduce energy consumption for different building typologies in different climate zones. *Clean Technologies And Environmental Policy*, *24(2), 493-518*. https://doi.org/10.1007/s10098-021-02183-z