

MUROS DE FARDOS DE PAJA DE TRIGO COMO SOLUCIÓN SOSTENIBLE EN LA CONSTRUCCIÓN: UN ESTADO DEL ARTE

WHEAT STRAW BALE WALLS AS A SUSTAINABLE CONSTRUCTION SOLUTION: A STATE OF THE ART

PAREDES DE FARDOS DE PALHA DE TRIGO COMO SOLUÇÃO SUSTENTÁVEL NA CONSTRUÇÃO: UM ESTADO DA ARTE

Henry Ramos-Rodríguez

Magíster en Ingeniería Civil mención en Estructuras
 Docente, Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción
 Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Sangolquí, Ecuador
<https://orcid.org/0000-0001-8981-6345>
haramos2@espe.edu.ec

Lourdes Granizo-Díaz

Estudiante de Ingeniería Civil
 Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador
<https://orcid.org/0009-0004-1833-6909>
lygranizo@uce.edu.ec

Jossue Lara-Boada

Estudiante de Ingeniería Civil
 Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador
<https://orcid.org/0009-0000-1633-1590>
jnlara@uce.edu.ec

RESUMEN

Ante el creciente interés por reducir el nivel de emisiones de CO₂ que genera el sector de la construcción se ha impulsado, en los últimos años, a la búsqueda de alternativas sostenibles mediante el uso de biomateriales. El objetivo de esta investigación se orienta al desarrollo del estado del arte sobre la bioconstrucción con muros de fardos de paja de trigo, se abordaron sus componentes, sistemas estructurales y propiedades. El artículo se basa en el análisis estadístico de la producción científica existente, se empleó como metodología la cienciaometría y bibliometría mediante la herramienta Bibliometrix y su interfaz web Biblioshiny. Los resultados de las publicaciones científicas analizadas demuestran la viabilidad y aprovechamiento de la paja como material de construcción con un bajo impacto ambiental. Y, se evidencia que existe gran interés por parte de varios autores debido a su amplia aplicabilidad. Se concluyó que los fardos de paja de trigo son una alternativa sostenible y su aplicación está respaldada por el Código Internacional Residencial, Normas profesionales para la construcción con paja y la Guía de construcción con Paja: Construcción sostenible y aislamiento con paja.

Palabras clave

muros, materiales de construcción, sistemas constructivos

ABSTRACT

Given the growing interest in reducing CO₂ emissions from the construction sector, there has been a push in recent years to find sustainable alternatives using biomaterials. The aim of this research is to review the state of the art in bio-construction using wheat straw bale walls, addressing their components, structural systems, and properties. The article is based on a statistical analysis of existing scientific production, using scientometrics and bibliometrics as a methodology through the Bibliometrix tool and its Biblioshiny web interface. The results of the analyzed scientific publications demonstrate the feasibility and use of straw as a low-impact building material, environmentally speaking. It is also evident that several authors are interested due to its wide applicability. It is concluded that wheat straw bales are a sustainable alternative, and their application is supported by the International Residential Code, Professional Standards for Straw Construction, and the Straw Construction Guidelines: Sustainable Construction and Insulation with Straw.

Keywords

walls, building materials, construction systems

RESUMO

Diante do crescente interesse em reduzir o nível de emissões de CO₂ geradas pelo setor da construção, nos últimos anos tem-se promovido a busca por alternativas sustentáveis por meio do uso de biomateriais. O objetivo desta pesquisa é apresentar o estado da arte da bioconstrução com paredes de fardos de palha de trigo, abordando seus componentes, sistemas estruturais e propriedades. O artigo baseia-se na análise estatística da produção científica existente, utilizando como metodologias a ciênciaometria e a bibliometria, por meio da ferramenta Bibliometrix e de sua interface web Biblioshiny. Os resultados das publicações científicas analisadas demonstram a viabilidade e o aproveitamento da palha como material de construção com baixo impacto ambiental. Evidencia-se, ainda, o grande interesse de vários autores devido à sua ampla aplicabilidade. Conclui-se que os fardos de palha de trigo são uma alternativa sustentável e que sua aplicação é apoiada pelo Código Internacional Residencial, pelas Normas profissionais para a construção com palha e pelo Guia de construção com palha: Construção sustentável e isolamento com palha.

Palavras-chave

paredes, materiais de construção, sistemas construtivos

INTRODUCCIÓN

Para el año 2025, el sector de la construcción es uno de los principales emisores de CO₂, al representar actualmente el 34% de las emisiones globales (United Nations Environment Programme [UNEP] & Global Alliance for Buildings and Construction [GlobalABC], 2025), lo que significa que está lejos de cumplir con los objetivos del Acuerdo de París de descarbonización para el 2030 y 2050 (United Nations, 2015). Entre los años 2015 y 2023, las emisiones de CO₂ derivadas de la construcción incrementaron 5.4%, en contraste con la reducción del 28.1% que se consideró necesaria para limitar el calentamiento global a no más de 1.5°C (UNEP, 2022). Y, aunque las certificaciones sostenibles mostraron una tendencia ascendente, permanecen 7.7 puntos porcentuales por debajo de los 9.8 necesarios (UNEP & GlobalABC, 2025). Estos indicadores reflejan la necesidad de adoptar materiales de construcción ecológicos y sostenibles, para cumplir con los compromisos climáticos globales (Durand et al., 2024).

A nivel mundial, para el 2023 existió una producción total de trigo de 777 millones de toneladas lo que genera aproximadamente 1.5 toneladas de paja por cada tonelada de grano cosechado (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2023). Y, aunque una parte, se utiliza como alimento para animales o mejorar el suelo, más del 70% se destruye mediante la quema (Meireles et al., 2024; Zhang et al., 2022). Por este motivo, su aplicación en la construcción proporciona un uso productivo y evita la liberación de contaminantes al aire que representan una alternativa sostenible y mucho más beneficiosa (Hu, 2023). Si bien la paja puede obtenerse de cereales como la cebada, arroz, maíz, avena y centeno, este estudio se ha limitado al trigo debido a su alto contenido de lignina y a la presencia de sílice, que garantiza propiedades adecuadas y mayor durabilidad del material (Durand et al., 2024).

A fines del siglo XIX se construyó la primera estructura con fardos de paja tras el desarrollo de las empacadoras a vapor en Nebraska, Estados Unidos (Koh & Kraniotis, 2020). Identificándose que, además de su amplia disponibilidad y bajo costo (Peng et al., 2023), ofrecían un excelente aislamiento térmico, insonorización y resistencia al fuego, sin requerir un procesamiento industrial complejo (Platt et al., 2020), que alcanza un 89.06% de disminución de las emisiones incorporadas totales (Vanova et al., 2021). No obstante, según el Código Internacional Residencial 2021, (International Residential Code [IRC], 2021), deben cumplir con ciertos requisitos: el contenido de humedad no debe superar el 20% de su peso y la densidad seca debe ser de al menos 104 kg/m³.

Los sistemas constructivos con fardos de paja emplean como componente principal la paja compactada en forma de bloques (H. Peng et al., 2021), los que

se utilizan como muros portantes o para relleno, frecuentemente en combinación con entramados de madera y revestimientos (Tlajji et al., 2022a). En el método Nebraska o autoportante, ver Figura 1a, son los propios fardos de paja, previamente comprimidos y apilados, los que soportan las cargas verticales de cubierta al igual que las horizontales de viento y sismo sin requerir elementos estructurales adicionales (Dimova & Georgiev, 2021). Una de sus ventajas es que no requiere conocimientos técnicos avanzados (Njike et al., 2020), por ende, el costo de construcción es bajo (Kozień-Woźniak et al., 2021).

Por otro lado, el método de Postes y Vigas se basa en la transferencia de las cargas de la edificación a un marco estructural, generalmente de madera como se muestra en la Figura 1b (Koh & Kraniotis, 2020). Donde los fardos de paja cumplen un papel exclusivamente de aislamiento térmico y acústico (Vanova et al., 2021). Por último, el método GREB, ver Figura 2, combina la rigidez de la estructura de madera ligera con la eficiencia térmica de la paja (Mutani et al., 2020), caracterizándose por la colocación de encofrados en ambos lados del muro para el vertido del mortero que sirve como recubrimiento (Díaz Fuentes et al., 2020). Este, está compuesto por una mezcla de cuatro partes de aserrín, tres de arena, una de cal y una de cemento (Amir et al., 2024; Moraes Santanna, 2023).

La construcción con fardos de paja se encuentra respaldada por diversas normativas y regulaciones (Ramos Rodríguez & Viera Arroba, 2025). El IRC determina los requisitos mínimos para viviendas uni y bifamiliares que incorporen este material (IRC, 2021). El Apéndice S: Construcción con fardos de paja, establece parámetros fundamentales como dimensiones, densidad, contenido de humedad, revoques, resistencia al fuego, entre otros (Viera Arroba, 2023). Por otro lado, las "Normas profesionales para la construcción con paja (Règles CP)", establecen parámetros similares a los analizados en el IRC. Además, incorporan procedimientos de calidad y control con fichas de autoverificación, métodos de cálculo simplificado y mapas de condicionantes climáticos, lo que permite adaptar la técnica a diferentes regiones (Sangmesh et al., 2023). De manera similar, la "Guía de construcción con Paja: Construcción sostenible y aislamiento con paja (DIBt)" ofrece un análisis muy parecido al de la normativa francesa, pero ampliado tanto a edificaciones nuevas como a rehabilitaciones (Plothe, 2024).

Finalmente, el objetivo de la investigación es demostrar que la incorporación de fardos de paja en la construcción representa una estrategia efectiva de descarbonización y economía circular, pues convierte un residuo agrícola en un reservorio estable de carbono, evitándose así el uso único de hormigón y acero (Shang et al., 2020; Taube & Morgenthal, 2024). Al promover cadenas cortas de suministro, se reducen emisiones de transporte y genera valor en áreas rurales donde la paja solía desecharse o quemarse (Tashkov et al., 2024; Wang et al., 2023).

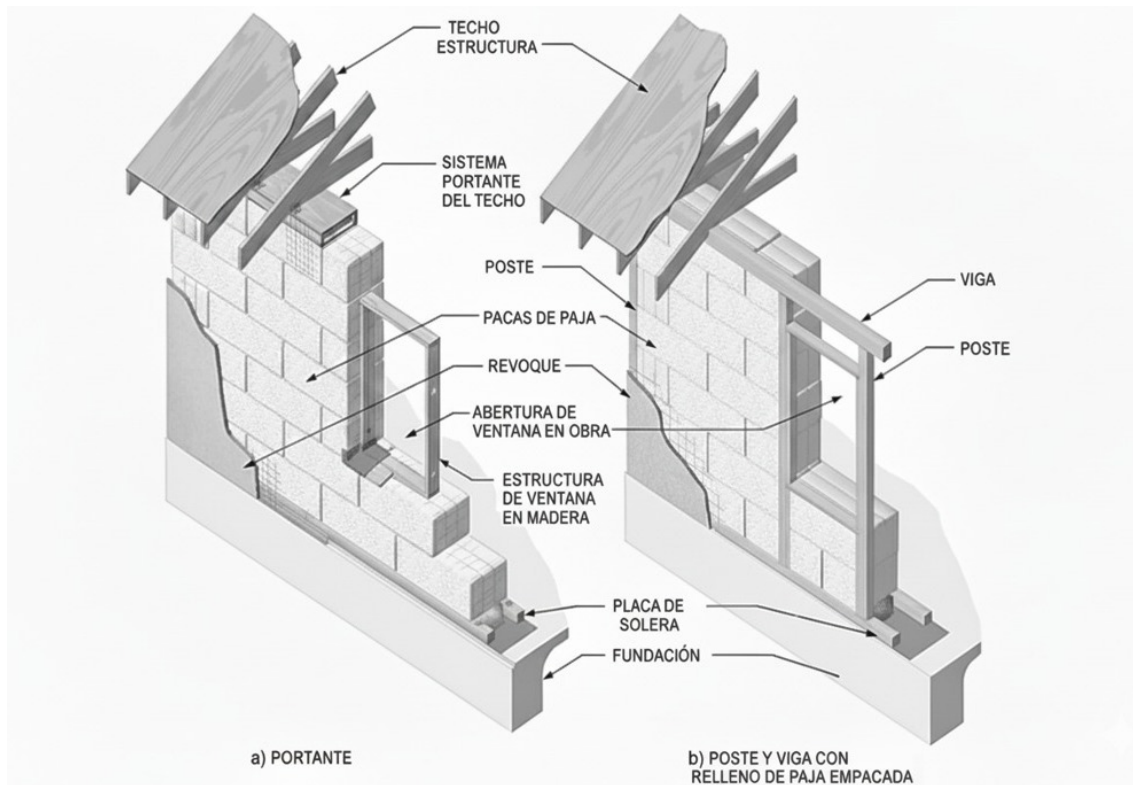


Figura 1. a) Método Nebraska o Load Bearing, b) Método Postes y Vigas. Fuente: Imagen extraída del IRC (2021).



Figura 2. Método GREB. Fuente: Elaboración de los autores.

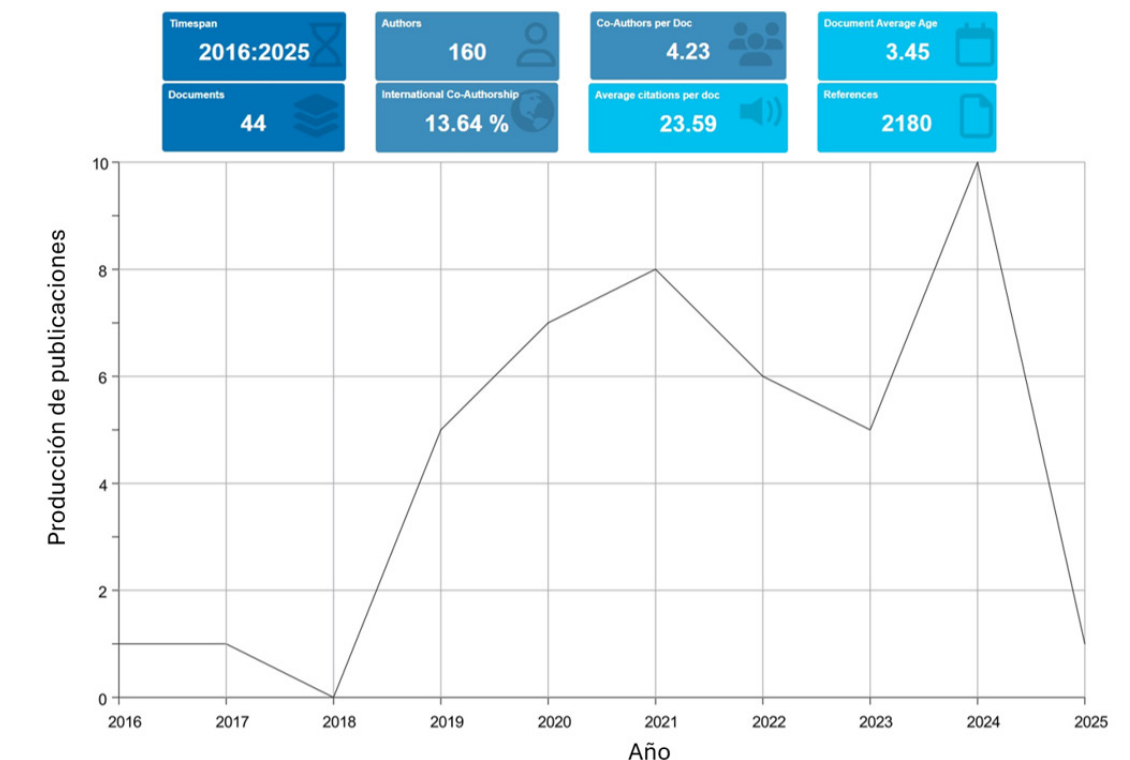


Figura 3. Información de las publicaciones utilizadas en el estudio. Fuente: Elaboración de los autores.

Técnicamente, los muros de paja ofrecen un aislamiento térmico y acústico comparable al de materiales sintéticos, que mejoran así el confort interior (Díaz Fuentes et al., 2020). Y, el respaldo normativo garantiza la viabilidad y seguridad de este sistema al favorecer su adopción en proyectos de construcción sostenible (Lehner et al., 2021; Lehner & Brázdilová, 2022).

METODOLOGÍA

Para la elaboración del presente estado del arte, se utilizó como fuente principal de información la base de datos Scopus, debido a su reconocida trayectoria científica y su sistema de indexación de publicaciones revisadas por pares. Para esta investigación se aplicaron combinaciones de términos de búsqueda como: "Straw" + "Characteristics", "Bales", "Walls", "Sustainable building". "Bio-based materials". Al limitar los resultados a publicaciones comprendidas entre los años 2016 y 2025, con el fin de garantizar la pertinencia y calidad de la información recopilada. Por otra parte, de manera manual se ha decidido examinar detalladamente cada una de ellas, pues resulta difícil encontrar investigaciones que abarquen todos los componentes, sistemas estructurales y propiedades de los muros de fardos de paja de trigo. Verificándose que se cumpla con el objetivo de la investigación.

Con la finalidad de lograr una mayor comprensión de la investigación y facilitar el análisis de las fuentes bibliográficas,

se ha optado por emplear "R", entorno y lenguaje de programación con un enfoque de análisis estadístico, donde Aria & Cuccurullo (2017) han desarrollado Bibliometrix y su interfaz web Biblioshiny como resultado de una colaboración académica, mismo que es distribuido bajo la licencia MIT. Al programa se carga la selección previa de información y este usa como metodología la cienciometría, disciplina dedicada al análisis cuantitativo de toda la producción científica, y una de sus ramas la bibliometría, especializada en la medición y evaluación de las publicaciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ANÁLISIS TEMPORAL Y PAÍSES DE ORIGEN DE LAS PUBLICACIONES SOBRE MUROS DE FARDOS DE PAJA DE TRIGO EN EL PERIODO ESTABLECIDO

La Figura 3, indica que las publicaciones analizadas dentro del período establecido cuentan con la participación de 160 autores y 2180 referencias bibliográficas en conjunto. Además, se puede notar que la edad promedio de las publicaciones es de 3.45 años, lo que confirma que se trata de un campo de estudio reciente y en constante desarrollo. A su vez, se muestra que el año 2024 es el de mayor importancia debido a su alta producción de investigación, que registró un total de 10 artículos publicados en la base de datos Scopus.

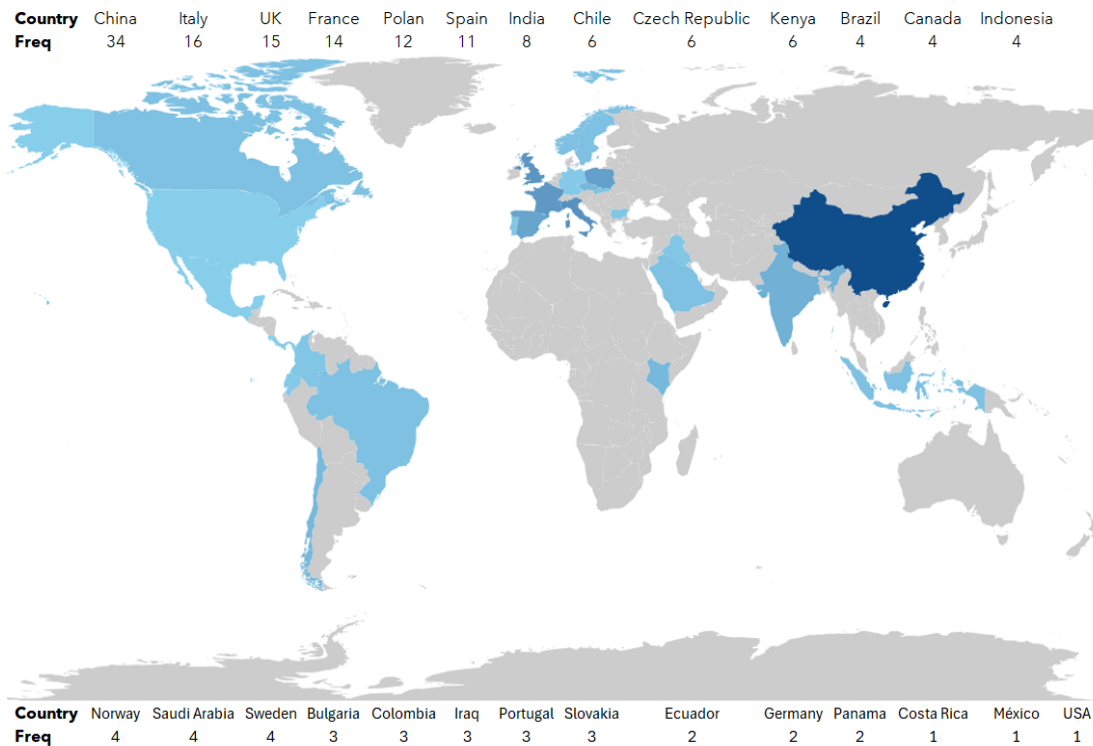


Figura 4. Distribución mundial de la producción de publicaciones utilizadas en el estudio. Fuente: Elaboración de los autores.

Finalmente, la Figura 4 proporciona una representación visual de la distribución geográfica de la producción científica analizada mediante el método de conteo completo, donde su intensidad se indica mediante colores. En este caso, los tonos oscuros reflejan una mayor concentración de investigaciones, mientras que los tonos claros muestran una menor actividad registrada. Se considera que las publicaciones con colaboración internacional son atribuidas al país de cada autor. Por ejemplo, China, Italia y Reino Unido destacan como los países con mayor producción científica con 34, 16 y 15 publicaciones respectivamente. En contraste, Costa Rica, México y USA presentan solo 1 por cada uno. Cabe señalar que esto no implica necesariamente la ausencia de investigación en dichos países, sino que puede deberse a limitaciones en la base de datos utilizada o a los criterios de selección aplicados durante la recopilación de datos.

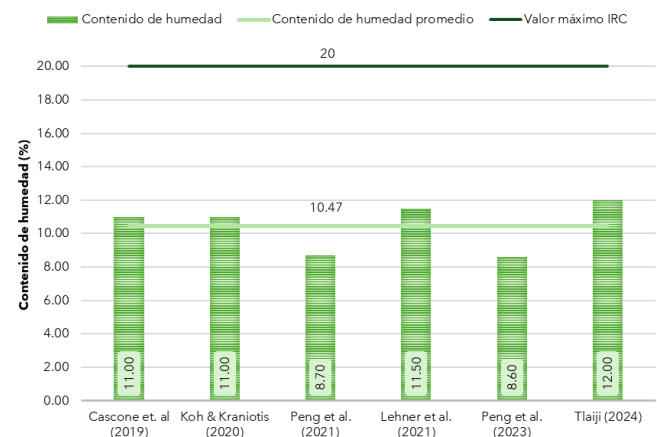


Figura 5. Contenido de humedad en los fardos de paja de trigo. Fuente: Elaboración de los autores.

PROPIEDADES DE LOS FARDOS DE PAJA

a) Contenido de humedad

En la Figura 5, los resultados demuestran cómo el contenido de humedad de los fardos de paja, analizados en las investigaciones, se mantiene dentro de un rango óptimo que oscila entre 8.6% a 12%, siendo el promedio 10.47%, encontrándose por debajo del límite del 20% establecido por el IRC, y además se cumple con la recomendación de no exceder el 15% (Cascone et al., 2019), permitiéndose, garantizar la integridad de la

paja y prevenir su degradación por la proliferación de moho y otros agentes biológicos. Adicionalmente, se observa que en los estudios de H. Peng et al. (2021) y Peng et al. (2023), trabajan con contenidos de humedad más bajos, en un rango del 8% al 9%. Mientras que, en las demás investigaciones estos valores incrementan ligeramente, situándose entre el 11% y 12%. Esta diferencia se atribuye a que los fardos de paja utilizados provienen de regiones con climas más secos durante la cosecha (Khalife et al., 2024), y al proceso de empaque, transporte y almacenamiento. Es importante señalar que, si bien se busca un bajo contenido de humedad,

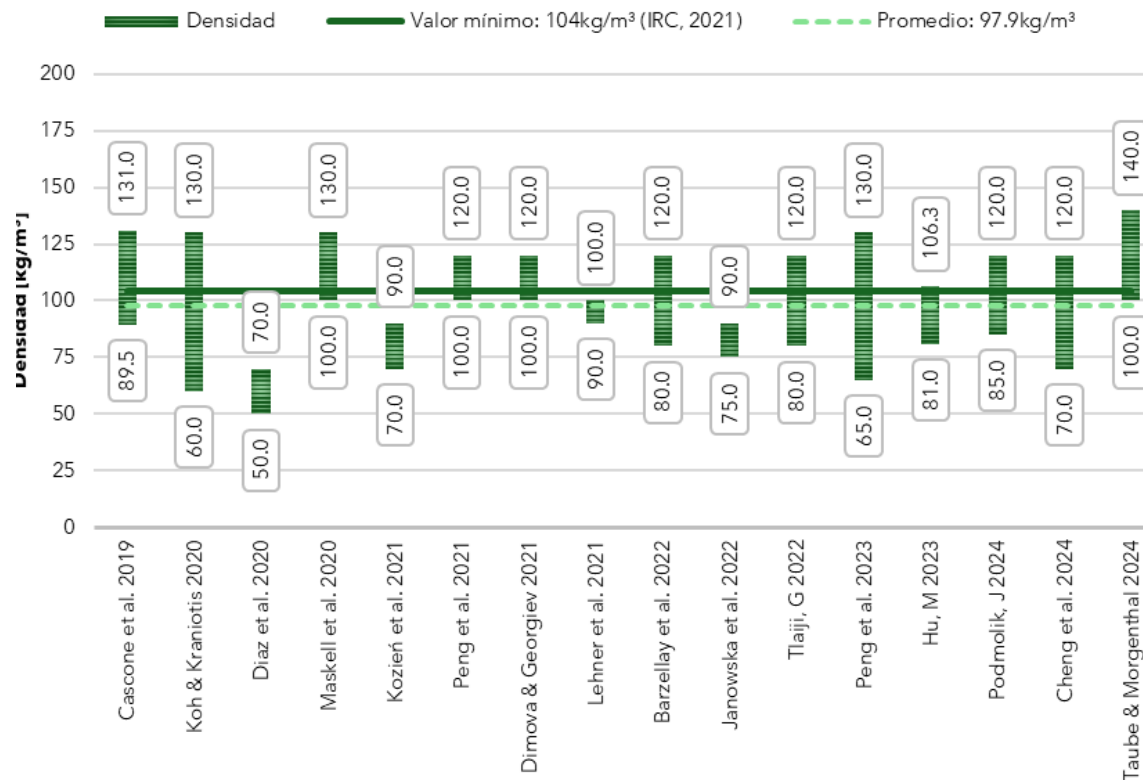


Figura 6. Valores aceptados de densidad de los fardos de paja. Fuente: Elaboración de los autores

no se han encontrado investigaciones que establezcan un límite inferior específico.

b) Densidad

Este parámetro influye de manera directa en su rendimiento térmico, acústico y estructural. De acuerdo con el IRC, se debe alcanzar una densidad mínima de 104kg/m^3 para asegurar un comportamiento adecuado. En la Figura 6, se observa como estos valores varían en cada investigación. Algunos autores, como Diaz Fuentes et al. (2020), Kozień-Woźniak et al. (2021), Lehner et al. (2021) y Janowska-Renkas et al. (2022), trabajan con fardos cuya densidad se encuentra por debajo del límite establecido por el IRC. Por el contrario, los demás investigadores utilizan fardos con densidades que comprenden rangos más amplios, con un límite inferior de 60 y superior de 140kg/m^3 . Según Fafara et al. (2022), aquellos con baja compactación se emplean principalmente como relleno, mientras que para aplicaciones estructurales se requiere una mayor magnitud. Además, es importante considerar que los fardos de paja se compactan durante el proceso constructivo por su peso propio (Walker et al., 2020).

PROPIEDADES DE LOS MUROS DE FARDOS DE PAJA

a) Permeabilidad al vapor de agua

Propiedad que determina la capacidad de un material para permitir el paso de vapor de agua (δ), al ser opuesta

al factor de resistencia a la difusión del vapor de agua (μ), que indica su dificultad para atravesarlo en relación con el aire. Los revestimientos a base de cal o arcilla son los más recomendados debido a su elevada porosidad (Walker et al., 2020). En la Tabla 1 se presentan cuatro investigaciones donde los autores examinan la relación entre la densidad de los fardos de paja y sus propiedades de transferencia de vapor δ y μ . Marques et al. (2020), en su investigación demuestra que mientras la densidad disminuye (100 a 80kg/m^3), la permeabilidad aumenta ($3.61\text{E-}11$ a $6.11\text{E-}11\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$) y la resistencia a la difusión decrece (5.47 a 3.25). En consecuencia, una menor compactación promueve el flujo de vapor en su interior, pero no siempre se cumple esta relación. Adicionalmente, también se incluyen valores referenciales del factor μ para una densidad de 100kg/m^3 , establecidos por la DIBt y RFCE de 2 y 1.5 respectivamente. En contraste con los resultados de H. Peng et al. (2021) y Tlajji et al. (2022a) estos presentan valores muy cercanos de 2.4 y 1.15, esto indica que, al contar con una densidad cercana a la establecida en el IRC, posee una buena permeabilidad.

b) Conductividad térmica

Es una propiedad física que representa la facilidad con la se transfiere calor en un material. El uso de fardos de paja es una de las características que más destaca por su excelente capacidad de aislamiento, misma que

Tabla 1. Permeabilidad y factor de resistencia a la difusión del vapor de agua. Fuente: Elaboración de los autores.

Referencias	Densidad [kg/m³]	Permeabilidad al vapor de agua [δ] [kg/(m*s*Pa)]	Factor de resistencia a la difusión del vapor de agua [μ]
(Marques et al., 2020)	80	6.11E-11	3.25
(Marques et al., 2020)	100	3.61E-11	5.47
(S. Peng et al., 2021)	75	3.6E-11	5.25
(S. Peng et al., 2021)	100	1E-10	2.4
(S. Peng et al., 2021)	110	4.4E-11	4.8
(S. Peng et al., 2021)	120	4.2E-11	5
(Tlajji et al., 2022b)	100	-	1.15
(Tlajji et al., 2022b)	350	-	2.92
(Tlajji, 2022)	80.6	1.19E-10	1.65
(Tlajji, 2022)	92.9	1.53E-10	1.3
(Tlajji, 2022)	97.5	1.04E-10	1.9
DIBt	100	-	2
RFCP	100	-	1.5

considera el ancho de pared (Dimova & Georgiev, 2021; Mohammed et al., 2024). En la Tabla 2, a partir de varias investigaciones, se observa un rango entre 0.035 y 0.097 W/m²K de conductividad térmica (λ), que demuestra que no existe una correlación lineal con la densidad. Mientras que Rojas et al. (2019) reportan 0.047 W/(m²K) con fardos de 105-112 kg/m³, Tlajji (2022), con una densidad similar de 100 kg/m³, presenta una conductividad notablemente más alta de 0.078 W/(m²K). Esto se debe a otras características como la calidad de empaquetado, contenido de humedad, orientación de las fibras y ancho de pared (Koh & Kraniotis, 2020). En general, la conductividad térmica disminuye cuando la dirección del flujo de calor es perpendicular a las fibras (Rota Front et al., 2024). Finalmente, el uso de fardos de paja son muy beneficioso al considerar que tienen un gran potencial para reducir el consumo de energía hasta en un 25% (Barzellay Ferreira da Costa et al., 2022).

c) Resistencia al fuego

La alta densidad con la que se empaquetan los fardos de paja minimiza la entrada de oxígeno en su interior y ayuda a retardar la combustión, que generan una capa que se carboniza y protege el núcleo (Platt et al., 2020). A esto se suma que la materia prima presenta un alto contenido de sílice, el que es considerado como un retardante de fuego natural (Podmolik, 2024). En la Figura 7 se presentan los tipos de revestimientos más comunes y el tiempo promedio de resistencia al fuego de varias investigaciones. Además, se incluye un tipo de panel prefabricado a base de paja, que consiste en una estructura ligera de madera con un relleno

Tabla 2. Conductividad térmica en función de la densidad y el ancho de pared. Fuente: Elaboración de los autores.

Referencia	Densidad [kg/m³]	Ancho pared [cm]	Conductividad térmica [W/mk]
(Koh & Kraniotis, 2021)	60-120	50	0.053-0.062
(Njike et al., 2021)	75	46	0.06
(Platt et al., 2020)	129	-	0.056
(Dimova & Georgiev, 2021)	100	30	0.052-0.07
(Evola et al., 2019)	75	20	0.069
(Díaz Fuentes et al., 2020)	60	-	0.067
(Tlajji et al., 2022a)	140-160	25	0.059-0.064
(Walker et al., 2020)	120	50	0.064
(Fafara et al., 2022)	90	45	0.06
(Kozieñ-Woźniak et al., 2021)	80	26	0.052
(Vanova et al., 2021)	-	36	0.056-0.097
(Janowska et al., 2022)	75-90	-	0.056-0.078
(Podmolik, 2024)	85-120	-	0.045
(Sun et al., 2023)	70-120	-	0.056
(Hu, 2023)	81-106	-	0.063
(Li et al., 2024)	-	-	0.035-0.051
(Rojas et al., 2019)	105-112	-	0.047
(Mutani et al., 2020)	100	37	0.038
(Tlajji, 2022)	100	40	0.078



Figura 7. Resistencia al fuego. Fuente: Elaboración de los autores

de fardos de paja recubiertos por una membrana hermética y transpirable, sobre la que se coloca un tablero de fibra de madera (Podmolik, 2024). A partir de estos resultados se evidencia que los revocos a base de cemento tienen el mejor comportamiento frente al fuego con 120 minutos, pero no son los ideales para este tipo de construcción dado que se considera como un material con baja permeabilidad. Por lo tanto, la mejor opción es el revoco a base de arcilla o cal con 90 minutos, que cumplen con los 60 minutos definidos en la sección AS107: Resistencia al fuego del IRC.

CONCLUSIONES

El IRC presenta una densidad mínima para los fardos de paja de 104 kg/m^3 . No obstante, alcanzar este valor suele ser complicado por la casi nula existencia de equipos adecuados, la mayoría de empacadoras son de uso agrícola y esto dificulta que se cumpla con el tamaño, amarrado y densidad especificados en la norma. Diversas investigaciones se han dedicado a demostrar que existe una aceptación, en un rango entre 80 kg/m^3 a 120 kg/m^3 . A diferencia de la densidad, el contenido de humedad máximo del 20% se cumple en todas las investigaciones analizadas que registran un promedio de 10.4% demostrándose su fácil obtención.

La aceptación de la densidad depende de la función de los fardos de paja. Cuando la estructura es tipo Nebraska, el fardo es un elemento estructural que soportará directamente todo el peso que hace necesario que se alcance una densidad alta. Por otro lado, en el sistema de Postes y Vigas o GREB el fardo es un elemento de relleno y se podría disminuir el valor de esta propiedad. Se considera que densidades demasiado bajas (60 kg/m^3) o excesivamente altas (160 kg/m^3) suelen generar

valores de λ desfavorables, que reducen la capacidad aislante del muro. Sin embargo, el aislamiento térmico del muro no solo depende de λ , también se ve influenciado por el ancho de la pared. Una mayor dimensión proporciona un aislamiento superior, aunque constructivamente no es eficiente dado que reduce el área habitable. En consecuencia, un rango de densidad es insuficiente para garantizar el aislamiento, se requiere una comprensión más profunda de variables como: la calidad de empacado, contenido de humedad, orientación de las fibras y ancho de pared para optimizar el rendimiento.

Al contrario de lo que comúnmente se cree, los muros de fardos de paja tienen un buen comportamiento frente al fuego. De acuerdo con el IRC se puede alcanzar resistencias al fuego de 60 a 120 minutos, dependiendo el tipo de revoco. Los resultados de las investigaciones analizadas demuestran que los revocos a base de arcilla y cal son los más demandados en la bio construcción, debido a su buena reacción frente al fuego y aislación térmica, que depende del espesor que puede alcanzar. De hecho, se evidencia que este tipo de revoco ofrece una resistencia al fuego de 90 minutos, situándose dentro del rango de seguridad establecido por la norma. A pesar de esto, se observa una ausencia de estudios que establezcan una dosificación específica en donde se garantice el desempeño esperado.

En conclusión, la permeabilidad al vapor de agua en los muros es un parámetro que no depende únicamente de la densidad de los fardos. Otros factores como el contenido de humedad de los fardos, la porosidad y el espesor del revoco también influyen significativamente y, aunque no siempre se incluyen en las investigaciones, deben ser considerados. Incluso para densidades iguales, se observa variabilidad. Para

su análisis el DIBt y RFCP presentan valores del factor de difusión del vapor de agua, propiedad que mide la dificultad de atravesar un material, pues a menor μ mayor δ . Para fardos con 100kg/m^3 , se reportan valores de μ de 2.4 y 1.15 en ciertos estudios, al ser cercanos a las recomendaciones de las normativas de 2 y 1.5. Esto determina que, elementos con densidades dentro del rango aceptable ofrecen una óptima transpirabilidad.

Finalmente, para que un muro de fardos de paja de trigo sea aceptado en el sector de construcción, se recomienda que sus elementos cumplan con algunos parámetros: el revoco debe ser a base de arcilla o cal, y los fardos tener un contenido de humedad inferior al 15% y una densidad entre 80 a 120kg/m^3 . Es imperativo que, para una buena aislación térmica, la dirección del flujo de calor en el muro sea perpendicular a las fibras de la paja. Además, los revocos recomendados son los ideales, no solo por su resistencia al fuego de aproximadamente 90 minutos, sino también por su porosidad y un nivel de espesor ajustable que permiten obtener un factor de resistencia μ entre 2.4 y 1.15. Todos estos criterios coinciden con lo estipulado en diversas normas internacionales cuyo propósito principal es establecer lineamientos que garanticen la seguridad de los ocupantes, la integridad de las construcciones y durabilidad en el tiempo.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, H.R., L.G. y J.L.; Curación de datos, H.R., L.G. y J.L.; Análisis formal, H.R., L.G. y J.L.; Adquisición de financiación, H.R., L.G. y J.L.; Investigación, H.R., L.G. y J.L.; Metodología, H.R., L.G. y J.L.; Administración de proyecto, H.R., L.G. y J.L.; Recursos, H.R., L.G. y J.L.; Software, H.R., L.G. y J.L.; Supervisión, H.R., L.G. y J.L.; Validación, H.R., L.G. y J.L.; Visualización, H.R., L.G. y J.L.; Escritura – borrador original, H.R., L.G., y J.L.; Escritura – revisión y edición, H.R., L.G. y J.L.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad Central del Ecuador y a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por fomentar la investigación científica. A pesar de ser un estudio desarrollado como una iniciativa independiente y autofinanciada, el soporte institucional resultó fundamental, dado que sus credenciales permitieron el acceso a bases de datos especializadas de alto impacto, esenciales para esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amir, F., Maricar, S., Mallisa, Z., & Pravita, N. (2024). Compressive strength of mortar with addition of sawdust. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1355(1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1355/1/012028>
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959-975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Barzellay Ferreira da Costa, B., Diminic, A. L., Guedes Sias Thompson, S. J., & Naked Haddad, A. (2022). Análisis de la perspectiva del usuario con respecto a los edificios con fardos de paja: Un estudio de encuesta. *Informes de la Construcción*, 74(568), e469. <https://doi.org/10.3989/ic.89959>
- Cascone, S., Rapisarda, R., & Cascone, D. (2019). Physical Properties of Straw Bales as a Construction Material: A Review. *Sustainability*, 11(12), 3388. <https://doi.org/10.3390/su11123388>
- Díaz Fuentes, C. X., Pérez Rojas, M. C., & Mancilla, J. J. (2020). Physical-thermal straw properties advantages in the design of a sustainable panel-type construction system to be used as an architectural dividing element. *Journal of Physics: Conference Series*, 1587, 012032. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1587/1/012032>
- Dimova, V., & Georgiev, D. (2021). Optimizing the thickness of a straw outer wall of a building for sows in a view to achieving cost-effective heat insulation. *Agricultural Science and Technology*, 13(2), 167-175. <https://doi.org/10.15547/ast.2021.02.028>
- Durand, K., Daassi, R., Rodrigue, D., & Stevanovic, T. (2024). Study of Purified Cellulosic Pulp and Lignin Produced by Wheat Straw Biorefinery. *Macromol*, 4(3), 650-679. <https://doi.org/10.3390/macromol4030039>
- Evola, G., Cascone, S., Sciuto, G., & Parisi, C. (2019). Performance comparison between building insulating materials made of straw bales and EPS for timber walls. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 609(7), 072020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/609/7/072020>
- Fąfara, M., Łukaszewski, Ł., Owczarek, E., & Żrebiec, I. (2022). Life cycle assessment (LCA) and environmental comparison of selected construction methods of residential buildings in traditional and straw cubes technology: A case study. *Archives of Civil Engineering*, 68(3), 241–255. <https://doi.org/10.24425/ace.2022.141883>
- Hu, M. (2023). Exploring Low-Carbon Design and Construction Techniques: Lessons from Vernacular Architecture. *Climate*, 11(8), 165. <https://doi.org/10.3390/cli11080165>
- International Residential Code [IRC]. (11 de enero de 2021). Apéndice como Construcción con Pacas de Paja. <https://codes.iccsafe.org/content/IRCSP2021P1/apendice-as-construccion-con-pacas-de-paja>
- Janowska-Renkas, E., Król, A., Pochwała, S., Pałubski, D., Adamska, M., & Klementowski, I. (2022). The Fire Resistance and Heat Conductivity of Natural Construction Material Based

on Straw and Numerical Simulation of Building Energy Demand. *Energies*, 15(3), 1155. <https://doi.org/10.3390/en15031155>

Khalife, E., Sabouri, M., Kaveh, M., & Szymanek, M. (2024). Recent Advances in the Application of Agricultural Waste in Construction. *Applied Sciences*, 14(6), 2355. <https://doi.org/10.3390/app14062355>

Koh, C. H., & Kraniotis, D. (2020). A review of material properties and performance of straw bale as building material. *Construction and Building Materials*, 259, 120385. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120385>

Koh, C., & Kraniotis, D. (2021). Hygrothermal performance, energy use and embodied emissions in straw bale buildings. *Energy and Buildings* 245, 111091. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111091>

Kozień-Woźniak, M., Fąfara, M., Łukaszewski, Ł., Owczarek, E., & Gierbienieś, M. (2021). Life cycle assessment of composite straw bale technology in residential buildings in the context of environmental, economical and energy perspectives – case study. En *Archives of Civil Engineering* 67(2), 49-65. <https://doi.org/10.24425/ace.2021.137154>

Lehner, P., & Brázdilová, H. (2022). Inverse Analysis of Straw Bale Mechanical Parameters in Load-Bearing Structures Based on a Finite Element Model. *Buildings*, 12(12), 2157. <https://doi.org/10.3390/buildings12122157>

Lehner, P., Horňáková, M., Vlček, P., & Teslík, J. (2021). Experimental Investigation of Two Test Setups on Straw Bales Used as Load-Bearing Elements of Buildings. *Buildings*, 11(11), 539. <https://doi.org/10.3390/buildings11110539>

Li, A., Guo, C., Gu, J., Hu, Y., Luo, Z., & Yin, X. (2024). Promoting Circular Economy of the Building Industry by the Use of Straw Bales: A Review. *Buildings*, 14(5), 1337. <https://doi.org/10.3390/buildings14051337>

Marques, B., Tadeu, A., Almeida, J., António, J., & Brito, J. de. (2020). Characterisation of sustainable building walls made from rice straw bales. *Journal of Building Engineering*, 28, 101041. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101041>

Meireles, I., Martín-Gamboa, M., Sousa, V., Kalthoum, A., & Dufour, J. (2024). Comparative environmental life cycle assessment of partition walls: Innovative prefabricated systems vs conventional construction. *Cleaner Environmental Systems*, 12, 100179. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2024.100179>

Mohammed, M. A., Budaiwi, I. M., Al-Osta, M. A., & Abdou, A. A. (2024). Thermo-Environmental Performance of Modular Building Envelope Panel Technologies: A Focused Review. *Buildings*, 14(4), 917. <https://doi.org/10.3390/buildings14040917>

Moraes Santanna, T. (2023). Construcción con balas de paja: Materiales tradicionales para respuestas actuales [Tesis de pregrado, Universitat Politècnica de València]. Repositorio Institucional UPV. <https://riunet.upv.es/handle/10251/199603>

Mutani, G., Azzolino, C., Macrì, M., & Mancuso, S. (2020). Straw Buildings: A Good Compromise between Environmental Sustainability and Energy-Economic Savings. *Applied Sciences*, 10(8), 2858. <https://doi.org/10.3390/app10082858>

Njike, M., Oyawa, W. O., & Abuodha, S. O. (2020). Structural Performance of Straw Block Assemblies under Compression Load. *The Open Construction & Building Technology Journal*, 14. <https://doi.org/10.2174/1874836802014010350>

Njike, M., Oyawa, W. O., & Abuodha, S. O. (2021). Enhancement of Straw Bale Performance Using Gum Arabic. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 15, 189-195. <https://doi.org/10.2174/1874836802115010189>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2023). *Perspectivas alimentarias*. <https://www.fao.org/giews/reports/food-outlook/es/>

Peng, H., Walker, P., Maskell, D., & Jones, B. (2021). Structural Characteristics of Load Bearing Straw Bale Walls. *Construction and Building Materials*, 287, 122911. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122911>

Peng, S., Luo, Q., Zhou, G., & Xu, X. (2021). Recent Advances on Cellulose Nanocrystals and Their Derivatives. *Polymers*, 13(19), 3247. <https://doi.org/10.3390/polym13193247>

Peng, H., Walker, P., & Maskell, D. (2023). Compressive load resistance of straw bale assemblies under concentric and eccentric loading. *Construction and Building Materials*, 397, 132434. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132434>

Platt, S., Maskell, D., Walker, P., & Laborel-Préneron, A. (2020). Manufacture and characterisation of prototype straw bale insulation products. *Construction and Building Materials*, 262, 120035. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120035>

Plothe, M. (28 de noviembre de 2024). Leitfaden Strohbau – Nachhaltig Bauen und Dämmen mit Stroh. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. <https://www.fnr.de/presse/pressemitteilungen/aktuelle-mitteilungen/aktuelle-nachricht/leitfaden-strohbau-nachhaltig-bauen-und-daemmen-mit-stroh>

Podmolik, J. (2024). *Review of the CUT technique* [Tesis de Magister, Lund University]. LUP Student Papers. <https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/9162802>

Ramos Rodríguez, H. A., & Viera Arroba, L. P. (2025). Caracterización de Paneles de Paja y su Evaluación Estructural en una Edificación de Tres Pisos. *Revista Politécnica*, 55(1), 29-40. <https://doi.org/10.33333/rp.vol55n1.03>

Rojas, C., Cea, M., Iriarte, A., Valdés, G., Navia, R., & Cárdenas-R, J. P. (2019). Thermal insulation materials based on agricultural residual wheat straw and corn husk biomass, for application in sustainable buildings. *Sustainable Materials and Technologies*, 20, e00102. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00102>

Rota Front, F., Ciriano Nogales, Y., Temes Mendoza, D., Vallbé Mumburí, M., Barbeta Solá, G., & De Felipe Blanch, J. J. (2024). Thermal Performance of a Straw Bale Building in Relation to Fiber Orientation: A Case Study. *Sustainability*, 16(23), 10304. <https://doi.org/10.3390/su162310304>

Sangmesh, B., Patil, N., Jaiswal, K. K., Gowrishankar, T. P., Karthik Selvakumar, K., Jyothi, M. S., Jyothilakshmi, R., & Kumar, S. (2023). Development of sustainable alternative materials for the construction of green buildings using agricultural residues: A review. *Construction and Building Materials*, 368, 130457. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130457>

- Shang, X., Song, S., & Yang, J. (2020). Comparative environmental evaluation of straw resources by LCA in China. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020(1), 4781805. <https://doi.org/10.1155/2020/4781805>
- Sun, C., Gu, J., Dong, Q., Qu, D., Chang, W., & Yin, X. (2023). Are straw bales better insulation materials for constructions? A review. *Developments in the Built Environment*, 15, 100209. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100209>
- Tashkov, L., Zlateva, P., & Penkova, N. (2024). Reducing the carbon footprint in the construction sector by replacing ceramic bricks with alternativa materials. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 59(6), 1347-1352. <https://doi.org/10.59957/jctm.v59.i6.2024.9>
- Taube, C., & Morgenthal, G. (2024). Experimental investigation of the biaxial load-bearing and deformation behaviour of wheat straw big bales for construction *Construction and Building Materials*, 433, 136630. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136630>
- Tlajji, G. (2022). Multi-scale study of straw buildings hygrothermal, environmental and mechanical behavior [Doctoral Thèse, Université Clermont Auvergne]. HAL Theses. <https://theses.hal.science/tel-04416366v1>
- Tlajji, G., Biwole, P., Ouldboukhitine, S., & Pennec, F. (2022a). A mini-review on straw bale construction. *Energies*, 15(21), 7859. <https://doi.org/10.3390/en15217859>
- Tlajji, G., Ouldboukhitine, S., Pennec, F., & Biwole, P. (2022b). Thermal and mechanical behavior of straw-based construction: A review. *Construction and Building Materials*, 316, 125915. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125915>
- United Nations. (2015). *Acción por el Clima. El Acuerdo de París*. <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>
- United Nations Environment Programme [UNEP]. (2022). *Informe sobre la situación mundial de los edificios y la construcción en 2022*. <https://www.unep.org/es/resources/publicaciones/informe-sobre-la-situacion-mundial-de-los-edificios-y-la-construccion-en>
- United Nations Environment Programme [UNEP]. & Global Alliance for Buildings and Construction [GlobalABC]. (2025). Not just another brick in the wall: The solutions exist—Scaling them will build on progress and cut emissions fast. Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/47214>
- Vanova, R., Vlcko, M., & Stefko, J. (2021). Life Cycle Impact Assessment of Load-Bearing Straw Bale Residential Building. *Materials*, 14(11), 3064. <https://doi.org/10.3390/ma14113064>
- Viera Arroba, L. P. (2023). Factibilidad constructiva de viviendas con muros portantes de fardos de paja energéticamente eficientes y sismo resistentes en la zona andina del Ecuador [Tesis Doctoral]. Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/196654>
- Walker, P., Thomson, A., & Maskell, D. (2020). Straw bale construction in K. A. Harries & B. Sharma (Eds.), *Nonconventional and vernacular construction materials. Characterisation, Properties and Applications* (2 ed., pp. 189–216). Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102704-2.00009-3>
- Wang, Y., Jiang, Z., Li, L., Qi, Y., Sun, J., & Jiang, Z. (2023). A Bibliometric and Content Review of Carbon Emission Analysis for Building Construction. *Buildings*, 13(1), 205. <https://doi.org/10.3390/buildings13010205>
- Zhang, L., Larsson, A., Moldin, A., & Edlund, U. (2022). Comparison of lignin distribution, structure, and morphology in wheat straw and wood. *Industrial Crops and Products*, 187(B), 115432. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115432>