

Artículo original

Evaluación experimental del comportamiento frente al fuego del bahareque en la sierra ecuatoriana

José Guaraca Freire^[1]  Andrés Hidalgo-Velastegui^[1]  Víctor Espín Guerrero^[1]  Mayra Viscaino-Cuzco^[1]  Bolívar Paredes-Beltrán^[1] 

[1] Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Universidad Técnica de Ambato (UTA). Ambato, Ecuador.



Autor para correspondencia: andresshidalgo@uta.edu.ec

Resumen

El bahareque es un sistema constructivo tradicional ampliamente utilizado en viviendas rurales y edificaciones patrimoniales de la sierra ecuatoriana. A pesar de su uso extendido, la información técnica disponible sobre su comportamiento frente al fuego bajo condiciones normalizadas es limitada. El presente estudio tiene como objetivo evaluar experimentalmente la reacción al fuego del bahareque mediante el ensayo de pequeña llama, conforme a la norma ISO 11925-2. Para ello, se elaboraron probetas representativas del sistema constructivo, utilizando materiales de origen local, y se realizó una caracterización física, mecánica y térmica previa al ensayo de fuego. Los resultados evidencian una propagación limitada de la llama, sin combustión sostenida ni caída de partículas inflamadas, así como una desaceleración progresiva de la velocidad de propagación del fuego. La propagación vertical máxima registrada fue significativamente inferior al umbral establecido en la normativa europea, lo que permite asociar el comportamiento del material a una clasificación de reacción al fuego favorable. En conjunto, los resultados indican que el bahareque presenta un desempeño adecuado frente al fuego en sus etapas iniciales, consolidándose como una alternativa constructiva viable desde el punto de vista de la inflamabilidad en edificaciones tradicionales.

Palabras Clave: *bahareque; construcción tradicional; reacción al fuego; ensayo de pequeña llama; seguridad contra incendios.*

Article

Experimental Evaluation of the Fire Behavior of Bahareque in the Ecuadorian Highlands

Abstract

Bahareque is a traditional construction system widely used in rural housing and heritage buildings in the Ecuadorian highlands. Despite its extensive application, technical information regarding its fire behavior under standardized testing conditions remains limited. This study aims to experimentally evaluate the fire reaction performance of bahareque using the small flame test, in accordance with ISO 11925-2. Representative specimens of the construction system were manufactured using locally sourced materials, and preliminary physical, mechanical, and thermal characterization was conducted prior to fire testing. The results indicate limited flame spread, absence of sustained combustion, and no occurrence of flaming droplets, along with a progressive reduction in flame propagation velocity over time. The maximum vertical spread recorded was significantly below the threshold established by European standards, allowing the material to be associated with a favorable reaction-to-fire classification. Overall, the findings suggest that bahareque exhibits adequate fire performance during the initial stages of exposure, supporting its technical viability in traditional construction from a fire safety perspective.

Keywords: *bahareque; traditional construction; reaction to fire; small flame test; fire safety.*

1. Introducción

Los sistemas constructivos tradicionales basados en tierra continúan desempeñando un papel relevante en la edificación rural y patrimonial de la región andina del Ecuador. Estas técnicas, desarrolladas a lo largo de siglos de adaptación al entorno natural y cultural, se caracterizan por el uso de materiales locales, procesos constructivos de bajo impacto ambiental y soluciones arquitectónicas acordes a las condiciones climáticas de la zona. Dentro de este conjunto de técnicas, el bahareque ha sido ampliamente empleado como sistema constructivo para muros y cerramientos livianos, combinando una estructura de elementos vegetales con una matriz de barro que aporta cohesión, protección superficial y estabilidad frente a agentes ambientales. Su permanencia en el tiempo responde no solo a criterios económicos y de disponibilidad de materiales, sino también a su valor cultural y a su integración con el paisaje construido tradicional (Dall'Orto & Cueva, 2025; Mora-Ruiz et al., 2025).

Desde una perspectiva técnica, el bahareque puede ser entendido como un material compuesto en el que interactúan componentes orgánicos e inorgánicos con propiedades físicas y mecánicas diferenciadas. La respuesta global del sistema depende de factores como la distribución granulométrica del suelo utilizado, el contenido de partículas finas, el grado de cohesión de la matriz de barro y la disposición del entramado vegetal. Estos aspectos han sido estudiados principalmente en relación con el comportamiento mecánico, la durabilidad y el confort térmico de las edificaciones construidas con tierra, destacándose ventajas como el buen desempeño térmico y la capacidad de regulación higratérmica. Sin embargo, otros aspectos relevantes para la seguridad de las edificaciones, como el comportamiento frente al fuego, han sido abordados de manera limitada y, en muchos casos, sin el respaldo de ensayos normalizados que permitan una evaluación objetiva y comparable (Charai et al., 2022; Giuffrida et al., 2024; Ruiz et al., 2025).

La vulnerabilidad frente al fuego constituye uno de los principales desafíos asociados al uso del bahareque y de otros sistemas constructivos tradicionales que incorporan materiales de origen vegetal. La presencia de elementos combustibles en la estructura, como el carrizo o la madera, ha generado históricamente una percepción de alto riesgo ante incendios, lo que ha condicionado su aceptación en procesos de regularización, rehabilitación y diseño de nuevas edificaciones. Esta percepción, sin embargo, no siempre se sustenta en evidencias experimentales obtenidas bajo condiciones controladas, y suele estar basada en apreciaciones cualitativas o en experiencias aisladas. La ausencia de información técnica rigurosa sobre la reacción al fuego del bahareque limita el desarrollo de estrategias efectivas para mejorar su seguridad y dificulta la toma de

decisiones informadas en contextos de conservación del patrimonio y vivienda rural (Goodhew et al., 2021; Kosiński et al., 2025).

En el ámbito de la seguridad contra incendios, los ensayos de reacción al fuego permiten evaluar la respuesta inicial de los materiales ante una fuente de ignición localizada, analizando parámetros como la ignitabilidad, la propagación de la llama y la extensión de la carbonización. Estos ensayos resultan fundamentales para estimar la contribución potencial de un material al crecimiento inicial de un incendio y constituyen la base para su clasificación dentro de sistemas de evaluación estandarizados. En particular, los ensayos de pequeña llama han sido ampliamente utilizados para la evaluación de materiales empleados en paredes y techos, debido a su capacidad para reproducir condiciones controladas de exposición térmica y generar resultados comparables entre distintos productos constructivos. La aplicación de este tipo de metodologías resulta especialmente pertinente en el estudio de sistemas tradicionales, donde la variabilidad constructiva y material puede dificultar evaluaciones a mayor escala (Araya-Letelier et al., 2021; Correa-Quezada et al., 2025; Ma et al., 2025; Mazur et al., 2024; Thomsen et al., 2025).

Diversos estudios han señalado que, en los materiales basados en tierra, las propiedades físicas y mecánicas influyen de manera indirecta en su comportamiento frente a acciones térmicas localizadas. Una distribución granulométrica adecuada, un contenido suficiente de partículas finas y una matriz cohesionada pueden favorecer una carbonización progresiva y limitar la propagación de la llama, reduciendo la pérdida súbita de material durante la exposición al fuego. En sistemas como el bahareque, estas características adquieren particular relevancia debido a la interacción entre la matriz de barro y los elementos vegetales del entramado, lo que puede modificar la respuesta térmica del conjunto frente a una fuente de ignición (Goodhew et al., 2021; Haddad et al., 2024; Kosiński et al., 2025; Li et al., 2022; Liu et al., 2024).

En el contexto ecuatoriano, y particularmente en la sierra andina, la información técnica disponible sobre el comportamiento frente al fuego del bahareque bajo ensayos normalizados sigue siendo escasa. Esta carencia limita la posibilidad de evaluar de manera objetiva su desempeño desde la perspectiva de la seguridad contra incendios y dificulta la incorporación de criterios técnicos en procesos de conservación, rehabilitación y diseño de edificaciones tradicionales. En este sentido, resulta necesario generar evidencia experimental que permita caracterizar la reacción al fuego del bahareque mediante metodologías reconocidas, aportando datos reproducibles y comparables que contribuyan a una evaluación técnica más equilibrada de este sistema constructivo (Asociación Española de Normalización, 2021). En este contexto, el presente trabajo

tiene como objetivo evaluar experimentalmente el comportamiento frente al fuego del bahareque utilizado en viviendas tradicionales de la sierra ecuatoriana mediante el ensayo de pequeña llama ISO 11925-2, analizando su respuesta a la ignición, la propagación de la llama y la carbonización, como base para la discusión de su desempeño desde la perspectiva de la seguridad contra incendios en edificaciones tradicionales.

2. Metodología

2.1. Enfoque metodológico y diseño experimental

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y experimental, estructurado en una fase preliminar y tres fases principales, orientadas a cumplir el objetivo de evaluar el comportamiento frente al fuego del bahareque utilizado en viviendas tradicionales de la sierra ecuatoriana. La fase preliminar estuvo destinada a la selección de materiales, caracterización básica del suelo y elaboración de las probetas. Posteriormente, la primera fase se centró en la determinación de propiedades físicas y mecánicas del material, con el propósito de disponer de una caracterización inicial que permitiera contextualizar su comportamiento frente a acciones térmicas. La segunda fase correspondió al acondicionamiento de las probetas y a la realización del ensayo de reacción al fuego mediante el método de pequeña llama, conforme a la norma ISO 11925-2 (Asociación Española de Normalización, 2021).

Finalmente, la tercera fase consistió en el procesamiento de los datos obtenidos durante los ensayos de fuego para la determinación de indicadores asociados a la inflamabilidad y la carbonización del material, así como en la recopilación de información bibliográfica para el análisis de la conductividad térmica del bahareque (Goodhew et al., 2021).

2.2. Materiales y equipos

Para la elaboración de las probetas de bahareque se emplearon materiales de origen local, representativos de las técnicas constructivas tradicionales de la región andina. Los componentes principales incluyeron suelo arcilloso, carrizo seco como elemento estructural, paja vegetal como refuerzo y melaza utilizada como aditivo estabilizante. La selección de estos materiales respondió a prácticas constructivas habituales del bahareque, con el objetivo de reproducir condiciones reales de uso. Previamente a la elaboración de las probetas, el suelo fue sometido a un proceso de selección manual para eliminar materia orgánica y elementos indeseables. Posteriormente, se realizaron ensayos básicos de identificación del suelo, incluyendo pruebas empíricas de contenido de arcilla, ensayos granulométricos y determinación de los límites de Atterberg, conforme a normativa técnica vigente para materiales de tierra (Giuffrida et al., 2024; Goodhew et al., 2021). Los equipos utilizados durante esta etapa y el proceso de extracción y preparación del suelo se ilustran en las Figuras 1 y 2.



Figura 1. Equipos utilizados para la caracterización del suelo: (A) horno eléctrico; (B) aparato de Casagrande.

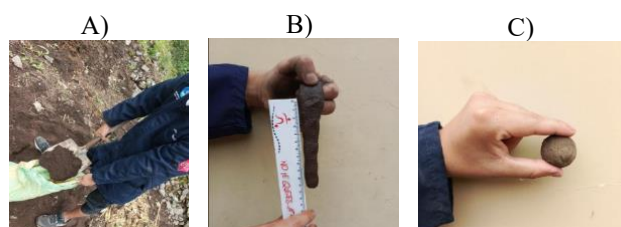


Figura 2. Proceso de extracción y preparación del suelo: (A) preparación del suelo; (B) prueba de cinta de barro; (C) prueba de presencia de arcillas.

2.3. Elaboración y tipología de las probetas de bahareque

La elaboración de las probetas se realizó utilizando moldes de madera diseñados para garantizar dimensiones uniformes y repetibles. El barro fue preparado mediante el tamizado previo del suelo y su posterior humectación con una solución de agua y melaza, incorporada gradualmente hasta alcanzar una consistencia plástica adecuada. La mezcla se dejó reposar durante un período mínimo de 24 horas con el fin de favorecer la activación de las partículas finas y mejorar la cohesión de la matriz. Posteriormente, se incorporó paja vegetal cortada en longitudes controladas, con el objetivo de reducir la aparición de fisuras durante el secado. El carrizo seco fue dispuesto en el interior de los moldes formando un entramado estructural, sobre el cual se colocó y compactó manualmente la mezcla de barro, como se muestra en la Figura 3.

Las probetas fueron desmoldadas tras un período inicial de fraguado y se dejaron secar bajo sombra durante aproximadamente cuatro semanas, con el fin de minimizar gradientes de humedad y fisuración excesiva. Se fabricaron distintos tipos de probetas en función del ensayo a realizar. Las probetas Tipo A fueron destinadas al ensayo de reacción al fuego y se elaboraron con dos orientaciones del carrizo (longitudinal y transversal), mientras que las probetas Tipo B se utilizaron para los ensayos mecánicos de compresión. La tipología, dimensiones y configuración de las probetas se

presentan en la Figura 4, mientras que el número y uso de las probetas elaboradas se resumen en la Tabla 1.



Figura 3. Proceso de elaboración de probetas de bahareque: (A) preparación del barro; (B) adición de paja a la mezcla; (C) elaboración de la probeta.

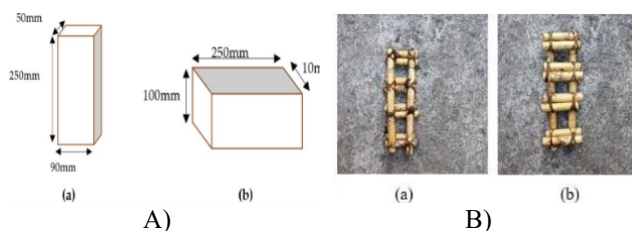


Figura 4. Tipología, dimensiones y orientación de las probetas de bahareque: (A) probetas para ensayos de reacción al fuego y compresión: (a) probeta tipo A (250 x 90 x 50 mm); (b) probeta tipo B (100 x 250 x 10 mm); (B) orientación del carrizo en las probetas tipo A: (a) disposición longitudinal; (b) disposición transversal.

Tabla 1. Número y tipo de probetas de bahareque empleadas en los ensayos.

Tipo de probeta	Orientación del carrizo	Ensayo	Cantidad
Tipo A	Transversal	Reacción al fuego	6
Tipo A	Longitudinal	Reacción al fuego	6
Tipo B	—	Compresión	10

2.4. Caracterización física y mecánica.

Una vez finalizado el proceso de secado, se procedió a la caracterización física y mecánica de las probetas. En cuanto a las propiedades físicas, se realizaron mediciones dimensionales básicas y se analizó la configuración del material en términos de número de capas y orientación del entramado vegetal, con el fin de identificar posibles comportamientos anisotrópicos (Araya-Letelier et al., 2021; Wu et al., 2018). Estas observaciones permitieron establecer una base descriptiva del material previa a su exposición a los ensayos térmicos.

Para la caracterización mecánica se realizaron ensayos de resistencia a la compresión y de dureza superficial. El ensayo de compresión se efectuó mediante una máquina universal

de ensayos, aplicando una carga progresiva y controlada hasta la falla de la probeta, siguiendo criterios adaptados de normativa para materiales de tierra ante la ausencia de un estándar específico para bahareque. La dureza superficial se determinó mediante un durómetro digital, conforme a la norma ISO 868. La configuración y ejecución de ambos ensayos se ilustran en la Figura 5. Los valores obtenidos se presentan posteriormente en la sección de resultados.



Figura 5. Ensayos mecánicos para la caracterización del bahareque: (A) ensayo de compresión; (B) medición de dureza superficial.

2.5. Ensayo de reacción al fuego

El ensayo de reacción al fuego se realizó de acuerdo con los lineamientos establecidos en la norma ISO 11925-2, empleando el método de pequeña llama. Previamente al ensayo, las probetas fueron identificadas mediante un sistema de nomenclatura y marcadas según la posición de aplicación de la llama (borde o superficie). Las muestras se acondicionaron en una cámara climática a una temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ y una humedad relativa de $(50 \pm 5)\%$, durante un periodo mínimo de 48 horas, hasta alcanzar masa constante, garantizando condiciones homogéneas antes del ensayo.

Durante el ensayo, las probetas fueron expuestas a una llama piloto aplicada durante 30 segundos, con un tiempo total de observación de hasta cinco minutos. La llama fue ajustada a una altura nominal de 20 mm y aplicada en posiciones específicas conforme a la normativa. La disposición de las probetas durante el ensayo, el ajuste del quemador y la aplicación de la llama tanto en borde como en superficie se ilustran en la Figura 6. Durante el procedimiento se registraron observaciones visuales y audiovisuales relacionadas con la ignición, la propagación de la llama y el comportamiento físico del material.

2.6. Registro térmico y procesamiento de datos.

Durante el ensayo de reacción al fuego se empleó una cámara térmica para registrar la evolución de la temperatura superficial del material desde el inicio de la exposición a la llama. La grabación térmica se inició simultáneamente con la aplicación de la llama y se mantuvo durante todo el periodo de ensayo. Se registraron temperaturas máximas y perfiles térmicos a intervalos regulares a lo largo de la probeta, con el fin de analizar la propagación del calor en el

material. El uso de la cámara térmica y el esquema de medición de temperatura a lo largo de la probeta se presentan en las Figuras 7 y 8. Los datos obtenidos durante los ensayos fueron procesados para la determinación del índice de inflamabilidad y del índice de carbonización, siguiendo criterios establecidos en normativa de clasificación de materiales frente al fuego (Goodhew et al., 2021).

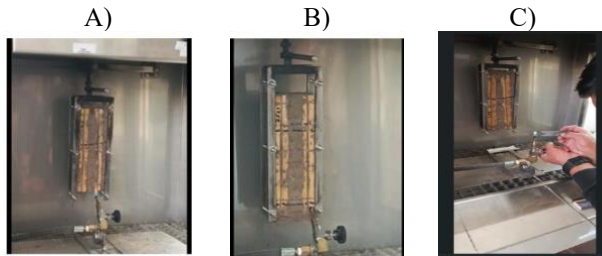


Figura 6. Configuración del ensayo de reacción al fuego (ISO 11925-2): (A) aplicación de la llama en el ensayo a borde; (B) aplicación de la llama en el ensayo a superficie; (C) ajuste del quemador y disposición de las probetas.

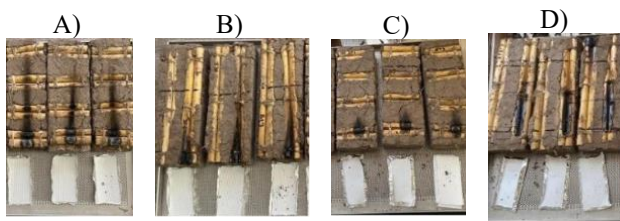


Figura 7. Probetas de bahareque tras el ensayo de reacción al fuego (ISO 11925-2): (A) borde-longitudinal; (B) borde-transversal; (C) superficie-longitudinal; (D) superficie-transversal.

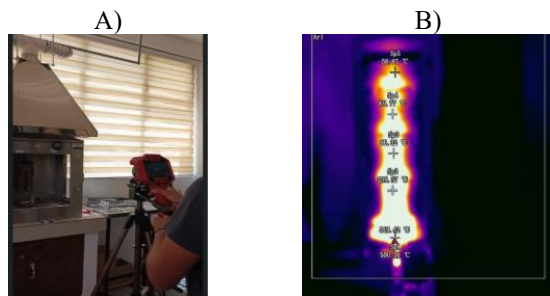


Figura 8. Registro térmico durante el ensayo de reacción al fuego: (A) medición mediante cámara térmica; (B) perfil de temperatura del material en intervalos de 50 mm.

3. Resultados

3.1. Caracterización del suelo

Los resultados de la caracterización granulométrica del suelo empleado para la elaboración del bahareque evidencian una composición adecuada para sistemas constructivos basados

en tierra. El análisis mostró un contenido de finos (limos y arcillas, partículas menores a 0.075 mm) del 26.22 %, mientras que el 73.78 % restante correspondió a fracciones arenosas. Esta distribución es representativa de suelos comúnmente utilizados en sistemas tradicionales de bahareque, donde una fracción arenosa predominante contribuye a la estabilidad volumétrica y los finos aportan cohesión a la matriz de barro. La curva granulométrica obtenida se presenta en la Figura 9.

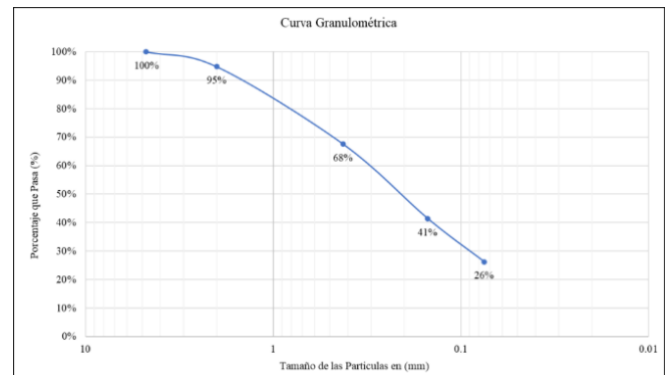


Figura 9. Curva granulométrica del suelo empleado en la elaboración de las probetas de bahareque.

En cuanto a los límites de consistencia, el ensayo de límite líquido arrojó un valor de 44.10 %, mientras que el límite plástico fue de 33.95 %, lo que permitió determinar un índice plástico de 10.14 %. Estos valores indican que el suelo presenta una plasticidad media, condición favorable para la elaboración de mezclas de barro trabajables y estables. A partir de estos resultados, el suelo fue clasificado como una arena limosa (SM) según el sistema SUCS y como un material del grupo A-2-7 según la clasificación AASHTO. Los resultados correspondientes al límite líquido se ilustran en la Figura 10.

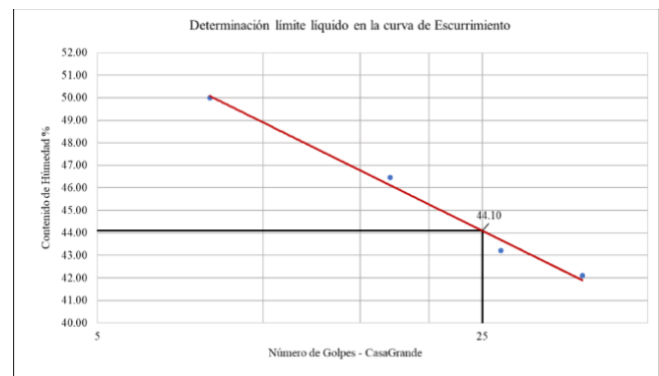


Figura 10. Curva de escurrimiento para la determinación del límite líquido del suelo (método de Casagrande).

3.2. Propiedades físicas y mecánicas del bahareque

Desde el punto de vista físico, el material analizado puede considerarse anisotrópico debido a su naturaleza constructiva, ya que la disposición del carrizo. (Tabla 3) influye en la respuesta mecánica y térmica del sistema. Las dimensiones de las probetas Tipo B, destinadas a los ensayos mecánicos, se mantuvieron relativamente homogéneas, con variaciones dimensionales del orden de ± 3 mm, como se resume en la Tabla 2. Esta uniformidad dimensional refleja un proceso de elaboración controlado y consistente, reduciendo la probabilidad de que diferencias geométricas influyan de manera significativa en los resultados obtenidos.

En relación con las propiedades mecánicas, los ensayos de compresión realizados sobre diez probetas de bahareque mostraron valores de resistencia que oscilaron entre 8.02 y 10.07 kg/cm², con un esfuerzo promedio de 9.18 kg/cm², como se presenta en la Tabla 2. Estos resultados evidencian

una respuesta mecánica relativamente uniforme entre las muestras ensayadas. El nivel de resistencia obtenido es coherente con el comportamiento esperado para materiales compuestos de barro reforzado con elementos vegetales, y confirma su idoneidad para aplicaciones estructurales ligeras, como cerramientos y muros no portantes.

En cuanto a la dureza superficial, los valores registrados en el carrizo presentaron un promedio de 64.6 HD, con variaciones moderadas entre los puntos evaluados, tal como se resume en la Tabla 6. Este nivel de dureza indica una resistencia superficial media-alta, característica de materiales vegetales con estructura fibrosa densa, lo que resulta relevante para el comportamiento del entramado frente a acciones mecánicas y térmicas iniciales.

Tabla 2. Dimensiones y resultados del ensayo de compresión en probetas de bahareque.

Probeta	Largo (cm)	Ancho (cm)	Carga máxima (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
1	30.00	9.80	2357.68	8.02
2	30.00	9.80	2961.67	10.07
3	29.90	9.80	2677.13	9.14
4	30.20	10.00	2852.89	9.45
5	29.90	10.00	2600.68	8.70
6	30.20	10.10	2834.29	9.29
7	29.80	9.90	2954.60	10.01
8	30.00	10.20	2832.92	9.26
9	29.70	10.30	2876.16	9.40
10	30.00	9.90	2521.13	8.49
Promedio				9.18

3.3. Ensayo de reacción al fuego

Los resultados del acondicionamiento de las probetas previo al ensayo de reacción al fuego evidenciaron variaciones de masa comprendidas entre 0.03 g y 0.08 g, valores que cumplen con los criterios establecidos en la norma ISO 11925-2 para la realización del ensayo. Tanto las probetas ensayadas a borde como aquellas ensayadas a superficie alcanzaron masa constante tras el período de acondicionamiento, como se detalla en la Tabla 4. Durante el ensayo de reacción al fuego, todas las probetas presentaron ignición al ser expuestas a la llama, independientemente de la orientación del carrizo y del tipo de aplicación (borde o superficie). No obstante, en ninguno de los casos la llama alcanzó la marca de 150 mm establecida como criterio de control ni se registró la caída de partículas inflamables sobre el papel filtro. Además, la llama se extinguió

inmediatamente tras el retiro de la fuente de ignición, lo que indica que la combustión no fue sostenida. Estos resultados se presentan en la Tabla 5 para los ensayos a borde y superficie, respectivamente.

En términos de propagación, el índice de inflamabilidad promedio fue de 0.29 mm/s para el ensayo a borde y de 0.20 mm/s para el ensayo a superficie, como se resume en la Tabla 6. Se observó que las probetas con carrizo orientado longitudinalmente tendieron a presentar mayores valores de propagación que aquellas con orientación transversal, particularmente en el ensayo a borde.

El análisis específico de la propagación de la llama durante los primeros 30 segundos del ensayo a borde mostró velocidades promedio de 0.41 mm/s, superiores a las

registradas al final del ensayo de 300 segundos. Este comportamiento evidencia una propagación inicial más rápida, seguida de una desaceleración progresiva del avance del fuego, como se observa en la Figura 11 y se resume en la Tabla 7.

3.4. Registro térmico

El registro térmico obtenido mediante cámara infrarroja permitió analizar la evolución de la temperatura superficial del bahareque durante el ensayo de reacción al fuego. En el ensayo a borde, las temperaturas máximas registradas oscilaron entre 544.64 °C y 597.29 °C, alcanzándose estos valores en tiempos comprendidos entre 215 y 295 segundos, como se presenta en la Tabla 8. Se observó que las probetas con carrizo transversal alcanzaron, en promedio, temperaturas máximas superiores a aquellas con orientación longitudinal.

En el ensayo a superficie, las temperaturas máximas registradas variaron entre 550.92 °C y 642.00 °C, con tiempos de alcance más variables, como se resume en la Tabla 8. En este caso, las probetas con carrizo orientado transversalmente también presentaron mayores temperaturas máximas promedio, lo que sugiere una menor resistencia a la propagación del calor en dicha configuración.

El análisis de la propagación térmica a lo largo de la probeta mostró una disminución significativa de la temperatura con el aumento de la distancia respecto al punto de aplicación de la llama. A 50 mm de distancia, la temperatura se redujo en más del 44 %, alcanzando disminuciones superiores al 58 % hacia el extremo opuesto de la probeta, como se observa en la Figura 12. Este comportamiento evidencia una baja capacidad del material para transmitir el calor a lo largo de su longitud.

Tabla 3. Dureza superficial del carrizo (Shore D) en los elementos del bahareque.

Punto	Dureza (Shore D)
1	60.0
2	58.5
3	71.5
4	64.0
5	69.0
Promedio	64.6

Tabla 4. Acondicionamiento de probetas para el ensayo de reacción al fuego (borde y superficie).

Ensayo	Código	Orientación	Masa inicial (g)	Masa a 72 h (g)	Δm (48–72 h) (g)	Cumple
Borde	BL1	Longitudinal	1086.91	1079.25	0.05	Sí
Borde	BL2	Longitudinal	1118.78	1078.54	0.04	Sí
Borde	BL3	Longitudinal	1074.41	1040.48	0.07	Sí
Borde	BT1	Transversal	1117.50	1093.70	0.05	Sí
Borde	BT2	Transversal	1095.24	1086.22	0.06	Sí
Borde	BT3	Transversal	1172.39	1163.23	0.07	Sí
Superficie	SL1	Longitudinal	1029.90	1011.39	0.04	Sí
Superficie	SL2	Longitudinal	1152.99	1133.76	0.03	Sí
Superficie	SL3	Longitudinal	1083.75	1076.12	0.04	Sí
Superficie	ST1	Transversal	1195.03	1177.82	0.07	Sí
Superficie	ST2	Transversal	1138.55	1125.98	0.08	Sí
Superficie	ST3	Transversal	1173.31	1147.02	0.04	Sí

Nota: Las probetas fueron acondicionadas durante 72 h bajo condiciones controladas de laboratorio (23 °C y 50 % HR). El cumplimiento del acondicionamiento se verificó mediante la variación de masa entre 48 y 72 h (Δm).

Tabla 5. Resultados del ensayo de reacción al fuego (ISO 11925-2) en probetas de bahareque: aplicación de llama a borde y a superficie.

Ensayo	Código	Orientación	Ignición	Tiempo de inicio (s)	Partículas inflamables (papel filtro)	Llama alcanza 150 mm	Tiempo de extinción (s)
Borde	BL1	Longitudinal	Sí	25	No	No	0
Borde	BL2	Longitudinal	Sí	19	No	No	0
Borde	BL3	Longitudinal	Sí	23	No	No	0
Borde	BT1	Transversal	Sí	6	No	No	0
Borde	BT2	Transversal	Sí	7	No	No	0
Borde	BT3	Transversal	Sí	7	No	No	0
Superficie	SL1	Longitudinal	Sí	6	No	No	0
Superficie	SL2	Longitudinal	Sí	7	No	No	0
Superficie	SL3	Longitudinal	Sí	12	No	No	0
Superficie	ST1	Transversal	Sí	6	No	No	0
Superficie	ST2	Transversal	Sí	8	No	No	0
Superficie	ST3	Transversal	Sí	7	No	No	0

Nota: Ensayo realizado conforme a NTE INEN-ISO 11925-2, con tiempo total de observación de 300 s. Probetas de 50 mm de espesor, acondicionadas 72 h en laboratorio. Aplicación de llama en configuración a borde o a superficie según procedimiento.

Tabla 6. Longitud calcinada y velocidad de propagación de la llama (índice de inflamabilidad) en probetas de bahareque: ensayo a borde y a superficie.

Ensayo	Código	Orientación	Longitud calcinada (mm)	Tiempo (s)	Velocidad de propagación (mm/s)
Borde	BL1	Longitudinal	69	300	0.23
Borde	BL2	Longitudinal	91	300	0.30
Borde	BL3	Longitudinal	104	300	0.35
Borde	BT1	Transversal	77	300	0.26
Borde	BT2	Transversal	100	300	0.33
Borde	BT3	Transversal	81	300	0.27
Superficie	SL1	Longitudinal	102	300	0.34
Superficie	SL2	Longitudinal	74	300	0.25
Superficie	SL3	Longitudinal	90	300	0.30
Superficie	ST1	Transversal	35	300	0.12
Superficie	ST2	Transversal	32	300	0.11
Superficie	ST3	Transversal	29	300	0.10

Nota: La velocidad de propagación se calculó como la razón entre la longitud calcinada y el tiempo total de observación (300 s), conforme al procedimiento del ensayo ISO 11925-2.

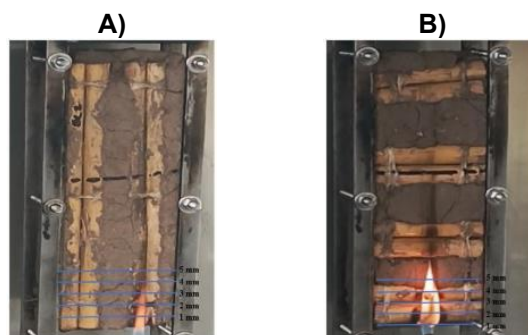


Figura 11. Distancia de propagación vertical de la llama en el ensayo a borde (30 s): (A) carrizo longitudinal; (B) carrizo transversal.

Tabla 7. Longitud calcinada y velocidad de propagación de la llama en el ensayo a borde (30 s).

Código	Orientación	Longitud calcinada (mm)	Tiempo (s)	Velocidad de propagación (mm/s)
BL1	Longitudinal	9.5	30	0.32
BL2	Longitudinal	10.6	30	0.35
BL3	Longitudinal	10.1	30	0.34
BT1	Transversal	13.5	30	0.45
BT2	Transversal	15.3	30	0.51
BT3	Transversal	14.8	30	0.49

Tabla 8. Temperatura registrada por cámara térmica durante el ensayo de reacción al fuego (300 s): aplicación de llama a borde y a superficie.

Ensayo	Código	Orientación	T a 30 s (°C)	T máxima (°C)	Tiempo a T máxima (s)
Borde	BL1	Longitudinal	371.51	544.64	295
Borde	BL2	Longitudinal	431.57	592.62	248
Borde	BL3	Longitudinal	408.15	546.67	244
Borde	BT1	Transversal	457.68	597.29	251
Borde	BT2	Transversal	443.61	592.59	215
Borde	BT3	Transversal	425.60	589.86	259
Superficie	SL1	Longitudinal	507.01	641.87	102
Superficie	SL2	Longitudinal	423.84	550.92	219
Superficie	SL3	Longitudinal	493.97	596.09	160
Superficie	ST1	Transversal	474.84	591.62	151
Superficie	ST2	Transversal	413.95	642.00	44
Superficie	ST3	Transversal	481.09	597.46	258

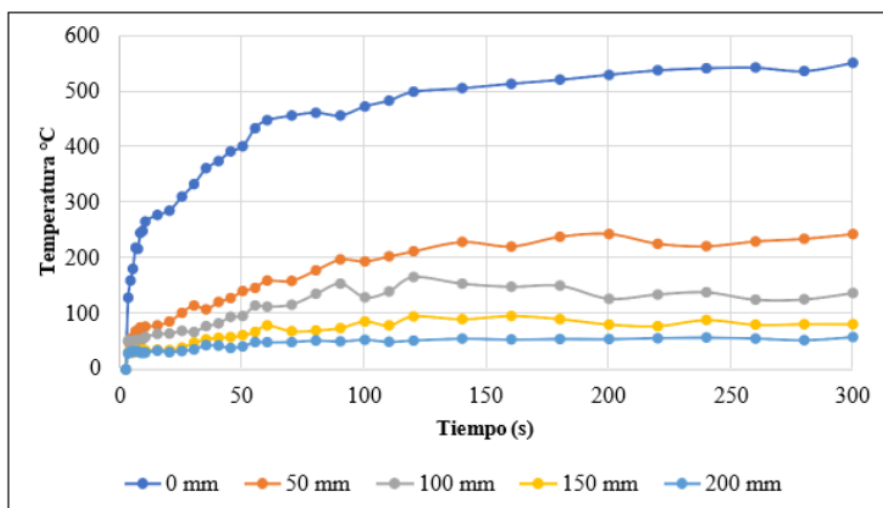


Figura 1. Gradiente térmico del bahareque en función del tiempo, evaluado en intervalos de 50 mm desde el punto de ignición.

En complemento a los registros visuales y a la evolución térmica observada, se evaluó la propagación vertical de la llama (Fs) en el ensayo a borde, con el fin de verificar el cumplimiento del criterio de clasificación establecido por el procedimiento (<150 mm). Los valores medidos se mantuvieron ampliamente por debajo de dicho umbral en todas las probetas, tanto en disposición longitudinal como transversal del carrizo, evidenciando una propagación vertical limitada bajo las condiciones controladas del ensayo. El detalle de los valores de Fs y la verificación del criterio se presenta en la Tabla 9.

Tabla 9. Propagación vertical de la llama (Fs) y verificación del criterio de clasificación (<150 mm) en el ensayo a borde.

Código	Fs (mm)	Cumple (Fs < 150 mm)
BL1	9.5	Sí
BL2	10.6	Sí
BL3	10.1	Sí
BT1	13.5	Sí
BT2	15.3	Sí
BT3	14.8	Sí

Asimismo, el índice de carbonización estimado mediante la pérdida de masa porcentual posterior al ensayo permitió cuantificar la degradación térmica del material. En general, se observaron pérdidas de masa reducidas tanto para la aplicación de llama a borde como a superficie, lo que sugiere un proceso de afectación térmica principalmente superficial y progresivo en el intervalo de observación considerado. Los

valores de masa inicial, masa final y pérdida de masa asociada a cada probeta se resumen en la Tabla 10.

Tabla 10. Índice de carbonización (pérdida de masa) en probetas de bahareque: ensayo a borde y a superficie.

Ensayo	Código	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Pérdida de masa (%)
Borde	BL1	1079.25	1076.48	0.26
Borde	BL2	1078.54	1076.09	0.23
Borde	BL3	1040.48	1038.79	0.16
Borde	BT1	1093.70	1089.69	0.37
Borde	BT2	1086.22	1085.05	0.11
Borde	BT3	1163.23	1159.86	0.29
Superficie	SL1	1011.39	1009.71	0.17
Superficie	SL2	1133.76	1131.97	0.16
Superficie	SL3	1076.12	1074.06	0.19
Superficie	ST1	1177.82	1176.93	0.08
Superficie	ST2	1125.98	1124.18	0.16
Superficie	ST3	1147.02	1143.88	0.27

4. Discusión

Los resultados obtenidos permiten caracterizar el comportamiento frente al fuego del bahareque desde una perspectiva experimental y compararlo con antecedentes reportados para sistemas constructivos basados en tierra (Goodhew et al., 2021). La composición granulométrica del suelo, con un contenido moderado de finos y predominio de fracción arenosa, contribuye a una matriz de barro

cohesionada pero estable, lo que influye positivamente en la respuesta del material frente a la acción térmica localizada (Tascón, 2018; Wu et al., 2018).

La resistencia mecánica promedio obtenida confirma que el bahareque es adecuado para aplicaciones estructurales ligeras, condición relevante al analizar su desempeño frente al fuego, ya que una matriz estable reduce la pérdida súbita de material durante la exposición térmica. Asimismo, la dureza superficial del carrizo sugiere que el entramado vegetal mantiene su integridad durante la fase inicial del ensayo, aunque se identificó que este componente es el principal afectado tras la exposición al fuego, lo cual es coherente con su naturaleza orgánica (Araya-Letelier et al., 2021; Mazur et al., 2024).

El comportamiento observado durante el ensayo de reacción al fuego, caracterizado por ignición sin propagación significativa ni combustión sostenida, es consistente con lo reportado para otros sistemas de construcción en tierra, donde el barro actúa como un retardante natural de la llama debido a su elevada capacidad térmica y baja combustibilidad (Goodhew et al., 2021; Ruiz et al., 2025). La ausencia de propagación hasta la marca de 150 mm y la extinción inmediata de la llama tras el retiro de la fuente de ignición indican un comportamiento favorable desde el punto de vista de la seguridad contra incendios.

La diferencia observada entre el ensayo a borde y a superficie, tanto en términos de índice de inflamabilidad como de temperatura máxima, sugiere que la geometría de exposición y la orientación del entramado vegetal influyen de manera significativa en la respuesta térmica del sistema. La mayor velocidad de propagación inicial registrada en el ensayo a borde puede asociarse a la exposición directa del carrizo, mientras que la desaceleración progresiva del avance del fuego evidencia la limitada transmisividad térmica del material (Goodhew et al., 2021).

Desde la perspectiva de clasificación frente al fuego, los valores obtenidos para la propagación vertical de la llama a los 30 segundos se encuentran muy por debajo del umbral de 150 mm establecido en la normativa europea, lo que permite asociar el comportamiento del bahareque a una clasificación de reacción al fuego de clase B. Este resultado refuerza la idea de que, bajo las condiciones evaluadas, el bahareque presenta una respuesta favorable frente a la acción directa de una llama pequeña, sin contribuir de manera significativa a la propagación del incendio.

En términos térmicos, el gradiente registrado durante el ensayo muestra una atenuación de la temperatura con la distancia al punto de ignición, lo que es consistente con el comportamiento esperado en sistemas de tierra y compuestos tierra-fibra, donde la masa térmica y la baja combustibilidad de la matriz tienden a limitar la transferencia de calor hacia zonas no expuestas. Este patrón complementa los indicadores de reacción al fuego obtenidos (Fs y pérdida de

masa), sugiriendo que la degradación se concentra en la zona inmediatamente afectada por la llama y no se traduce en una propagación rápida a lo largo del elemento (Goodhew et al., 2021; Mazur et al., 2024; Mora-Ruiz et al., 2025).

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos en el presente estudio permiten caracterizar de manera objetiva el comportamiento frente al fuego del bahareque utilizado en viviendas tradicionales de la sierra ecuatoriana, a partir de ensayos experimentales realizados bajo condiciones normalizadas. La caracterización del suelo empleado evidenció una composición adecuada para la elaboración de bahareque, con un contenido de finos del 26.22 % y un predominio de fracción arenosa, lo que favorece una adecuada combinación entre trabajabilidad y estabilidad volumétrica. El índice de plasticidad de 10.14 %, correspondiente a una plasticidad baja a moderada, confirma la idoneidad del material para este tipo de aplicaciones constructivas, evitando contracciones excesivas durante el secado.

Desde el punto de vista físico y mecánico, el bahareque analizado presentó un comportamiento anisotrópico asociado a la disposición del entramado vegetal, condición inherente a este sistema constructivo. La variación dimensional aproximada de ± 3 mm registrada en las probetas refleja un proceso de fabricación uniforme y controlado. La resistencia a la compresión promedio de 9.18 kg/cm² confirma que el material es apto para aplicaciones estructurales ligeras, como muros no portantes y cerramientos, coherente con su uso tradicional en edificaciones rurales.

En relación con el comportamiento frente al fuego, los ensayos de reacción realizados conforme a la norma ISO 11925-2 evidenciaron que la propagación vertical de la llama no superó el umbral de 150 mm establecido como criterio de control. Asimismo, la llama se extinguió inmediatamente tras el retiro de la fuente de ignición, sin combustión sostenida ni caída de partículas inflamadas. Estos resultados indican una propagación lenta del fuego en las etapas iniciales de exposición, lo que sugiere un desempeño favorable del material desde la perspectiva de la seguridad contra incendios.

El análisis de la velocidad de propagación de la llama mostró una clara desaceleración a lo largo del ensayo, con valores promedio de 0.43 mm/s en los primeros 30 segundos y de 0.29 mm/s a los 300 segundos en el ensayo a borde. Este comportamiento puede asociarse a la baja transmisividad térmica del bahareque y a la formación progresiva de una capa carbonizada que limita la continuidad de la combustión, reduciendo la propagación del fuego conforme avanza la exposición térmica.

En cuanto a los mecanismos de degradación observados, el carrizo fue el componente más afectado tras la exposición al fuego, lo cual es coherente con su naturaleza vegetal y su menor resistencia térmica en comparación con la matriz de barro. Si bien esta degradación puede comprometer la adherencia entre el entramado y el recubrimiento en escenarios de exposición prolongada, bajo las condiciones evaluadas la contribución del material orgánico a la combustión inicial fue limitada, debido al efecto retardante del barro, el cual actúa como un material de alta capacidad térmica y baja combustibilidad.

Finalmente, la propagación vertical máxima de la llama registrada para probetas de 50 mm de espesor fue de 15.3 mm, valor significativamente inferior al límite de 150 mm establecido en la normativa UNE-EN 13501-1. Este resultado permite asociar el comportamiento del bahareque a una clasificación de reacción al fuego de clase B, destacando su capacidad para resistir la acción directa de una llama pequeña sin una propagación significativa. En conjunto, los resultados obtenidos evidencian que el bahareque, bajo las condiciones evaluadas, presenta un desempeño favorable frente al fuego en sus etapas iniciales, consolidándose como una alternativa constructiva técnicamente viable desde el punto de vista de la inflamabilidad en edificaciones tradicionales.

Referencias

- Araya-Letelier, G., Antico, F. C., Burbano-Garcia, C., Concha-Riedel, J., Norambuena-Contreras, J., Concha, J., & Saavedra Flores, E. I. (2021). Experimental evaluation of adobe mixtures reinforced with jute fibers. *Construction and Building Materials*, 276, 122127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122127>
- Asociación Española de Normalización. (2021). UNE-EN ISO 11925-2:2021 Ensayo con una fuente de llama única. (ISO 11925-2:2020). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0065532>
- Charai, M., Mezrhab, A., & Moga, L. (2022). A structural wall incorporating biosourced earth for summer thermal comfort improvement: Hygrothermal characterization and building simulation using calibrated PMV-PPD model. *Building and Environment*, 212, 108842. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108842>
- Correa-Quezada, L., Carrión-Correa, V., López, C., Segura, D., & Carrión-Paladines, V. (2025). Towards Integrated Fire Management: Strengthening Forest Fire Legislation and Policies in the Andean Community of Nations. *Fire*, 8(7), 266. <https://doi.org/10.3390/fire8070266>
- Dall'Orto, V., & Cueva, K. M. (2025). Living Architecture: The Role of Intermediate Spaces in the Social Sustainability of Andean Rural Housing. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su17188267>
- Giuffrida, G., Dipasquale, L., Pulselli, R. M., & Caponetto, R. (2024). Compared Environmental Lifecycle Performances of Earth-Based Walls to Drive Building Envelope Design. *Sustainability*, 16(4), 1367. <https://doi.org/10.3390/su16041367>
- Goodhew, S., Boutouil, M., Streiff, F., Le Guern, M., Carfrae, J., & Fox, M. (2021). Improving the thermal performance of earthen walls to satisfy current building regulations. *Energy and Buildings*, 240, 110873. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110873>
- Haddad, K., Lannon, S., & Latif, E. (2024). Investigation of Cob construction: Review of mix designs, structural characteristics, and hygrothermal behaviour. *Journal of Building Engineering*, 87, 108959. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108959>
- Kosiński, P., Jabłoński, W., & Patyna, K. (2025). Parametric Analysis of Rammed Earth Walls in the Context of the Thermal Protection of Environmentally Friendly Buildings. *Sustainability*, 17(15), 6886. <https://doi.org/10.3390/su17156886>
- Li, M., Zhang, J., Guo, Y., Pu, H., & Peng, Y. (2022). Influence of particle size distribution on fractal characteristics of waste rock backfill materials under compression. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 2977–2989. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.056>
- Liu, H., Zhao, F., Xie, X., Jiang, Y., Jiang, Z., Ruan, R., Zhang, M., Li, H., & Qu, W. (2024). Effects of particle size of CL-20 on its thermal decomposition and combustion characteristics. *Fuel*, 369, 131555. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131555>
- Ma, Y., Tao, S., Guo, Z., Gu, Y., Zhao, Z., Li, Z., Ding, S., Chung, S. H., Fujita, O., & Hu, L. (2025). Flame spread over solid materials under reduced buoyancy/gravity. *Progress in Energy and Combustion Science*, 111, 101251. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2025.101251>
- Mazur, Ł., Szlachetka, O., Jeleniewicz, K., & Piotrowski, M. (2024). External Wall Systems in Passive House Standard: Material, Thermal and Environmental LCA Analysis. *Buildings*, 14(3), 742. <https://doi.org/10.3390/buildings14030742>
- Mora-Ruiz, V., Soto-Paz, J., Attia, S., & Mejía-Parada, C. (2025). Sustainable Earthen Construction: A Meta-Analytical Review of Environmental, Mechanical, and Thermal Performance. *Buildings*, 15(6), 918. <https://doi.org/10.3390/buildings15060918>
- Ruiz, D. M., Reyes, J. C., Alvarado, Y. A., Vacca, H., Tarque, N., & Jerez, S. (2025). Investigating Scale Effects on Experimental Shear Strength of Earthen Walls (Adobe and Rammed-Earth). *Buildings*, 15(5), 689. <https://doi.org/10.3390/buildings15050689>
- Tascón, A. (2018). Influence of particle size distribution skewness on dust explosibility. *Powder Technology*, 338, 438–445. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.07.044>
- Thomsen, M., Fernandez-Pello, C., Urban, D. L., & Olson, S. L. (2025). Extinction of opposed flame spread over thin paper. *Proceedings of the Combustion Institute*, 41, 105951. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2025.105951>
- Wu, J., Feng, M., Mao, X., Xu, J., Zhang, W., Ni, X., & Han, G. (2018). Particle size distribution of aggregate effects on mechanical and structural properties of cemented rockfill: Experiments and modeling. *Construction and Building Materials*, 193, 295–311. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.208>

Contribución de los autores (CRediT)

Espín Guerrero, V.: Conceptualización, Metodología, Análisis formal de datos, Validación, Redacción – borrador original. **Paredes-Beltrán, B.:** Conceptualización, Análisis formal de datos, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición, Supervisión. **Hidalgo- Velastegui, A.:** Metodología, Investigación, Curación de contenidos y datos. **Guaraca Freire, J.:** Metodología, Investigación, Curación de contenidos y datos, Visualización. **Viscaino-Cuzco, M.:** Validación, Investigación, Redacción – revisión y edición.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento

Los autores agradecen a la Universidad Técnica de Ambato por el apoyo financiero canalizado a través de la Dirección de Investigación y Desarrollo (DIDE) para la ejecución de esta investigación, en el marco del Proyecto PFICM30: “Caracterización del comportamiento frente al fuego de materiales de construcción utilizados en obra civil”. Adicionalmente, B.P.-B. agradece a la Universidad Técnica de Ambato por el apoyo financiero recibido mediante su Programa de Movilidad Doctoral (Reconocimiento No. 1886-CU-P-2018, Resolución HCU).

Disponibilidad de datos

Los datos que respaldan los hallazgos de este estudio están disponibles a solicitud razonable al autor de correspondencia.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo continuo del grupo de investigación “Gestión de Recursos Naturales e Infraestructura Sustentable” (GeReNIS) de la Universidad Técnica de Ambato. Asimismo, expresan su reconocimiento al personal técnico del “Laboratorio de Investigación Mecánica LIM-UTA” de la Universidad Técnica de Ambato por su asistencia durante la preparación de muestras y la ejecución de los ensayos experimentales.

Conflicto de intereses

Los autores han declarado que no existe conflicto de intereses en esta obra. Los financiadores no tuvieron ningún rol en el diseño del estudio; en la recolección, análisis o interpretación de los datos; en la redacción del manuscrito; ni en la decisión de publicar los resultados.

Disponibilidad de datos

Los datos que respaldan los hallazgos de este estudio están disponibles a solicitud razonable al autor de correspondencia.

Declaración sobre el uso de IA generativa y tecnologías asistidas por IA

El manuscrito no incluye una declaración específica respecto al uso de herramientas de inteligencia artificial durante su proceso de redacción. La autoría, así como la responsabilidad total del contenido, recaen exclusivamente en los autores.

Nota del Editor

Descargo de responsabilidad: Los datos, declaraciones, opiniones contenidas en el documento son responsabilidad únicamente de los autores y no de la *Revista Científica FINIBUS – Ingeniería, Industria y Arquitectura*. La Revista y sus editores renuncian a toda responsabilidad por daño a persona o propiedad resultante de los métodos, instrucciones, producto o idea mencionado en el contenido.



Derechos de autor 2026.

Esta obra está bajo una licencia:
Internacional Creative Commons
Atribución-NoComercial-CompartirIgual
.4.0

Revista Científica *FINIBUS* - ISSN: 2737-6451.

