

## DESEMPEÑO ECOLÓGICO Y FINANCIERO DE VIVIENDAS TERROSAS DIGITALMENTE FABRICADAS FRENTE A SISTEMAS TRADICIONALES: REVISIÓN SISTEMÁTICA

### ECOLOGICAL AND FINANCIAL PERFORMANCE OF DIGITALLY FABRICATED EARTHEN HOUSING VERSUS TRADITIONAL SYSTEMS: A SYSTEMATIC REVIEW

**Tipo de Publicación:** Artículo Científico

**Recibido:** 29/04/2026

**Aceptado:** 31/05/2026

**Publicado:** 03/06/2026

**Código Único AV:** e742

**Páginas:** 1(1316-1337)

**DOI:** <https://doi.org/10.5281/zenodo.20531748>

**Autores:**

**Luz Clarita Córdova Córdova**

Ingeniería Industrial



<https://orcid.org/0000-0003-1231-5715>

**E-mail:** [luz.cordovac@unmsm.edu.pe](mailto:luz.cordovac@unmsm.edu.pe)

**Afiliación:** Universidad Nacional Mayor de San Marcos

**País:** República del Perú

**Amador Pinedo García**

Ingeniero Civil

Doctor en Ingeniería Civil



<https://orcid.org/0009-0005-8972-2708>

**E-mail:** [pinedoamador@gmail.com](mailto:pinedoamador@gmail.com)

**Afiliación:** Universidad Nacional Federico Villareal

**País:** República del Perú

**Diego Angel Pinedo Chavez**

Ingeniero Civil

Maestro en Gestión Pública



<https://orcid.org/0009-0004-8794-4262>

**E-mail:** [diego.pinedochavez@gmail.com](mailto:diego.pinedochavez@gmail.com)

**Afiliación:** Universidad San Martín de Porres

**País:** República del Perú

**Jorge Luis Hilario Rivas**

Ingeniero Industrial

Doctor en Ingeniería de Sistemas



<https://orcid.org/0000-0003-1283-5630>

**E-mail:** [dr@jorgeluisrivas.com](mailto:dr@jorgeluisrivas.com)

**Afiliación:** Universidad Nacional de Ucayali

**País:** República del Perú

#### Resumen

La impresión 3D aplicada a la construcción con arcilla se presenta como una alternativa emergente frente a los sistemas constructivos convencionales, especialmente por su potencial para reducir residuos, optimizar materiales y aprovechar recursos locales de bajo impacto. Sin embargo, su sostenibilidad ambiental y económica aún requiere una evaluación crítica, debido a que los beneficios atribuidos a esta tecnología dependen de la composición de las mezclas, el consumo energético, los estabilizantes utilizados y las fases consideradas dentro del ciclo de vida. El objetivo de este artículo fue comparar los indicadores de sostenibilidad ambiental y económica reportados en la literatura entre viviendas de arcilla impresas en 3D y viviendas construidas con métodos convencionales, considerando el ciclo de vida completo. Se desarrolló un artículo de revisión sistemática siguiendo lineamientos metodológicos orientados a la identificación, selección y análisis crítico de estudios científicos indexados relacionados con impresión 3D, arcilla, tierra, sostenibilidad, costos y análisis de ciclo de vida. Los resultados evidenciaron que la literatura disponible se concentra principalmente en indicadores ambientales, como potencial de calentamiento global, carbono incorporado, emisiones de CO<sub>2</sub> y demanda energética, mientras que los indicadores económicos y las evaluaciones cradle-to-grave siguen siendo limitados. Asimismo, se observó que los estudios revisados analizan mayormente mezclas, morteros, prototipos o ensamblajes parciales, antes que viviendas completas en condiciones reales de uso. Se concluye que la arcilla impresa en 3D posee un potencial relevante para reducir impactos ambientales frente a sistemas intensivos en cemento; no obstante, su viabilidad sostenible dependerá de estudios integrales que incorporen costos, operación, mantenimiento, durabilidad y fin de vida.

#### Palabras Clave

Sostenibilidad ambiental, impresión 3D con arcilla, análisis de ciclo de vida, indicadores económicos, construcción convencional.

#### Abstract

Three-dimensional printing applied to clay-based construction has emerged as a promising alternative to conventional building systems, particularly because of its potential to reduce waste, optimize material use, and employ locally available low-impact resources. However, its environmental and economic sustainability still requires critical assessment, since the benefits attributed to this technology depend on mix composition, energy consumption, stabilizers used, and the life cycle stages considered. The objective of this article was to compare the environmental and economic sustainability indicators reported in the literature for 3D-printed clay housing and conventionally built housing, considering the full life cycle. A systematic review article was conducted following methodological guidelines for the identification, selection, and critical analysis of indexed scientific studies related to 3D printing, clay, earth, sustainability, costs, and life cycle assessment. The results showed that the available literature focuses mainly on environmental indicators, such as global warming potential, embodied carbon, CO<sub>2</sub> emissions, and energy demand, whereas economic indicators and cradle-to-grave assessments remain limited. Likewise, the reviewed studies mostly analyze mixtures, mortars, prototypes, or partial assemblies rather than complete houses under real-use conditions. It is concluded that 3D-printed clay has significant potential to reduce environmental impacts compared with cement-intensive systems; however, its sustainable viability will depend on comprehensive studies that incorporate costs, operation, maintenance, durability, and end-of-life stages.

#### Keywords

Environmental sustainability, 3D clay printing, life cycle assessment, economic indicators, conventional construction.

## Introducción

La impresión 3D aplicada a la construcción constituye una tecnología de manufactura aditiva que permite fabricar elementos constructivos mediante la deposición controlada de materiales, capa por capa. Esta forma de producción ha despertado un interés creciente porque, en comparación con ciertos métodos tradicionales, puede contribuir a reducir residuos, acortar tiempos de ejecución y disminuir costos laborales, especialmente cuando se optimizan los procesos de diseño, mezcla y colocación del material (Khosravani & Haghighi, 2022). La verdad es que su atractivo no radica únicamente en la innovación tecnológica, sino también en la posibilidad de repensar la manera en que se construyen viviendas más eficientes y menos agresivas con el ambiente.

En el caso de los materiales terrosos, la arcilla ocupa un lugar especial dentro de la construcción sostenible. Desde hace siglos ha sido utilizada como recurso constructivo debido a su abundancia, bajo costo, disponibilidad local y buen desempeño higrotérmico, además de requerir un procesamiento industrial mucho menor que otros materiales de alta demanda energética (Abdallah, 2024).

Y es que, a diferencia de los materiales convencionales altamente industrializados, la arcilla permite recuperar saberes constructivos tradicionales y combinarlos con tecnologías contemporáneas, como ocurre con la impresión 3D.

Esta convergencia abre un campo interesante, donde lo artesanal y lo digital no necesariamente se oponen, sino que pueden complementarse.

La articulación entre manufactura aditiva y construcción terrosa se fundamenta, además, en los principios del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), metodología estandarizada bajo la norma ISO 14040, que permite cuantificar los impactos ambientales de un producto o sistema durante todas sus etapas: extracción de materias primas, producción, transporte, uso, mantenimiento y disposición final (Arduin et al., 2022). Este marco teórico resulta indispensable para evaluar comparativamente la sostenibilidad de los sistemas constructivos, porque no se limita a observar una sola fase del proceso, sino que examina el desempeño ambiental desde una mirada más amplia y completa.

En ese sentido, el ACV permite integrar indicadores como el potencial de calentamiento global, la energía embebida y el consumo de recursos, ofreciendo una perspectiva más rigurosa que aquellas evaluaciones centradas únicamente en la fase de producción. Además, cuando se estudian viviendas impresas en 3D con arcilla, esta herramienta resulta especialmente valiosa, pues permite identificar si los beneficios atribuidos a la construcción terrosa se mantienen cuando el material es adaptado a procesos digitales de fabricación. Dicho de otro modo, no basta con

afirmar que la arcilla es sostenible; es necesario comprobarlo a lo largo de todo su ciclo de vida.

En los últimos años, diversos estudios han contribuido al conocimiento sobre la sostenibilidad comparativa de la impresión 3D en construcción. Alhumayani et al., (2020) realizaron una de las primeras evaluaciones ambientales comparativas entre impresión 3D de cob y de concreto mediante un ACV de tipo cradle-to-site. Sus resultados demostraron que los métodos basados en cob presentan menores impactos ambientales globales y menor potencial de calentamiento global que los sistemas basados en concreto. Sin embargo, también identificaron un aspecto que merece especial atención: el consumo eléctrico durante la operación de impresión se convirtió en el principal factor de impacto ambiental del cob impreso.

Por su parte, Abdalla et al., (2021) desarrollaron un análisis combinado de ACV y costos del ciclo de vida para una vivienda impresa en 3D en Emiratos Árabes Unidos. El estudio encontró que la construcción aditiva con mortero cementante redujo el potencial de calentamiento global en un 47 % y los costos de capital en un 78 % respecto a la construcción convencional de concreto. Estos hallazgos resultan relevantes porque muestran que la impresión 3D puede ser una alternativa ecoeficiente; no obstante, también dejan ver que sus beneficios dependen, en buena medida,

del tipo de material utilizado y de las condiciones técnicas del proceso constructivo.

De manera complementaria, Salandín et al., (2022) evaluaron el primer edificio impreso en 3D en España y reportaron un excelente desempeño térmico, con una transmitancia de 0,24 W/m<sup>2</sup>K. A primera vista, este resultado evidencia el potencial de la impresión 3D para mejorar el comportamiento energético de las edificaciones. Sin embargo, su análisis comparativo de ciclo de vida reveló que la fachada impresa en 3D emitía un 30 % más de CO<sub>2</sub> equivalente que una fachada de bloques de concreto convencional, principalmente debido al alto contenido de cemento en la mezcla de impresión.

Estos antecedentes permiten advertir que la impresión 3D en construcción no puede ser considerada sostenible de manera automática. La tecnología, por sí sola, no garantiza mejores resultados ambientales o económicos. Más bien, su desempeño depende de factores como la composición del material, el consumo energético del equipo, la escala del proyecto, la durabilidad del sistema constructivo y las condiciones locales de producción. Por ello, el análisis comparativo entre viviendas de arcilla impresas en 3D y viviendas construidas con métodos convencionales requiere una revisión cuidadosa, capaz de distinguir entre promesas tecnológicas y evidencias realmente comprobadas.

A pesar de estos avances, la literatura presenta vacíos significativos que limitan una comprensión integral sobre la sostenibilidad de las viviendas de arcilla impresas en 3D. En primer lugar, Gomaa et al., (2022), en su revisión crítica sobre manufactura digital de construcción terrosa, señalaron que, aunque existen estudios de factibilidad sobre el desempeño estructural y térmico del cob impreso, aún son insuficientes los datos a largo plazo sobre durabilidad y comportamiento higrotérmico en condiciones reales de habitabilidad. Esta ausencia de información resulta preocupante, porque una vivienda no solo debe funcionar bien en laboratorio o en prototipos experimentales, sino también responder adecuadamente al uso cotidiano, al clima, al paso del tiempo y al mantenimiento real que puede recibir.

En segundo lugar, Rocha et al., (2023) identificaron que los desarrollos en manufactura aditiva de morteros de arcilla todavía se encuentran en una etapa incipiente. Entre los principales vacíos destacan la falta de estandarización de las composiciones y la limitada verificación de las propiedades de confort pasivo que tradicionalmente se atribuyen a la construcción terrosa convencional. La verdad es que este punto resulta clave, porque modificar la arcilla para hacerla imprimible puede alterar algunas de sus cualidades originales, del mismo modo que una receta tradicional cambia cuando se adapta a una producción mecanizada.

En tercer lugar, Yin et al., (2023) confirmaron que la construcción digital con arcilla se encuentra en rápido desarrollo y presenta un potencial importante para contribuir a la neutralidad de carbono. Sin embargo, también advirtieron que la durabilidad y la resistencia al agua de los materiales terrosos modificados para impresión 3D requieren mayor investigación, especialmente si se pretende garantizar un ciclo de vida verdaderamente sostenible. Además, la integración de indicadores económicos con indicadores ambientales permanece todavía poco explorada en este contexto específico.

En conjunto, estos vacíos muestran que la discusión sobre viviendas de arcilla impresas en 3D todavía se encuentra en una fase de construcción científica. Existen avances prometedores, sí, pero también preguntas pendientes que no pueden ser ignoradas. Entre ellas destacan la necesidad de contar con estudios comparativos más completos, evaluaciones de ciclo de vida que incorporen la fase de uso y mantenimiento, análisis económicos más precisos y evidencia empírica sobre el desempeño de estas viviendas en condiciones reales. Por ello, resulta necesario desarrollar una revisión sistemática que ordene la evidencia disponible y permita valorar, con mayor claridad, hasta qué punto esta tecnología representa una alternativa sostenible frente a los métodos constructivos convencionales.

Considerando los vacíos identificados, el presente artículo de revisión sistemática tiene como objetivo comparar los indicadores de sostenibilidad ambiental y económica reportados en la literatura entre viviendas de arcilla impresas en 3D y viviendas construidas con métodos convencionales, considerando el ciclo de vida completo. De esta manera, se busca aportar una visión más ordenada y crítica sobre los beneficios, limitaciones y condiciones bajo las cuales la impresión 3D con arcilla puede constituirse en una alternativa viable para la construcción sostenible de viviendas.

### Metodología

La presente revisión sistemática se desarrolló siguiendo las directrices establecidas en la declaración PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses).

Se seleccionó Scopus como única base de datos para la búsqueda sistemática, decisión fundamentada en tres razones principales. En primer lugar, Scopus constituye la mayor base de datos de literatura revisada por pares a nivel mundial, con cobertura multidisciplinaria que integra revistas de ingeniería civil, ciencias ambientales, materiales y manufactura aditiva, áreas directamente vinculadas al objetivo de esta revisión

La estrategia de búsqueda se operacionalizó mediante la siguiente fórmula booleana, diseñada para capturar la intersección temática entre

impresión 3D, construcción con arcilla, sostenibilidad y análisis de ciclo de vida: (*"3D printing" OR "additive manufacturing" OR "3D printed" OR "digital fabrication"*) AND (*"clay" OR "earth" OR "cob" OR "adobe" OR "earth-based"*) AND (*"construction" OR "building" OR "housing" OR "wall"*) AND (*"sustainability" OR "life cycle assessment" OR "LCA" OR "environmental impact" OR "cost" OR "economic"*)

Para guiar la revisión sistemática y estructurar el análisis de los estudios incluidos, se formularon las siguientes preguntas de investigación: PI1: ¿Cuáles son los indicadores ambientales — potencial de calentamiento global, energía embebida y consumo de recursos— reportados en la literatura para viviendas de arcilla impresas en 3D y cómo se comparan con los valores reportados para sistemas constructivos convencionales? PI2: ¿Qué indicadores económicos —costos de construcción, operación y mantenimiento— han sido evaluados en estudios de viviendas de arcilla impresas en 3D y cuáles son las diferencias cuantitativas respecto a métodos convencionales? PI3: ¿Qué fases del ciclo de vida (extracción de materias primas, manufactura, construcción, operación y fin de vida) presentan mayor y menor cobertura en los estudios comparativos existentes, y qué implicaciones tiene esto para la evaluación integral de la sostenibilidad? (Ver Tabla 1).

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Artículos originales de investigación y artículos de revisión publicados en revistas científicas con revisión por pares.	Actas de conferencias, tesis doctorales, informes técnicos, capítulos de libro y literatura gris.
Publicaciones redactadas en inglés o español.	Estudios cuyo texto completo no estuvo disponible mediante acceso abierto o suscripciones institucionales.
Estudios sobre impresión 3D o manufactura aditiva con materiales terrosos, como arcilla, cob, adobe o tierra.	Investigaciones sobre impresión 3D con materiales cementantes, poliméricos o metálicos sin componente terroso.
Estudios aplicados a elementos constructivos o edificaciones con alcance habitacional o constructivo.	Estudios centrados únicamente en aplicaciones artísticas, cerámicas decorativas o prototipos reducidos sin aplicabilidad constructiva demostrada.
Estudios que reportaron al menos un indicador cuantitativo de sostenibilidad ambiental, como GWP, energía embebida, emisiones de CO <sub>2</sub> o consumo de agua.	Publicaciones descriptivas o conceptuales sin datos cuantitativos de sostenibilidad ambiental.
Estudios que reportaron al menos un indicador cuantitativo de sostenibilidad económica, como costos de materiales, mano de obra, construcción, operación o mantenimiento.	Publicaciones descriptivas o conceptuales sin datos cuantitativos de sostenibilidad económica.
Estudios con comparación directa o indirecta frente a sistemas constructivos convencionales, como mampostería, concreto armado o bloques.	Estudios que no permitieron establecer comparación con sistemas constructivos convencionales.
Estudios que proporcionaron datos suficientes para establecer una comparación ambiental o económica.	Registros duplicados, conservándose únicamente la versión más completa o reciente.

**Tabla 1.** Criterios de inclusión y exclusión

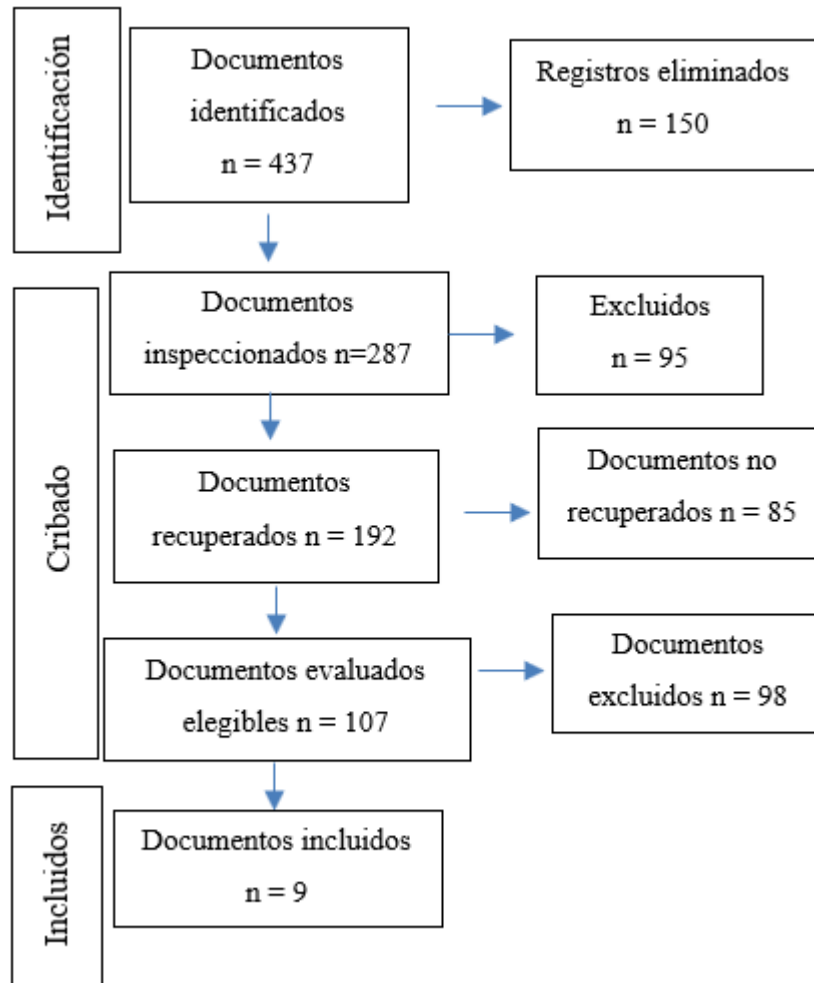


Figura 1. Flujograma del método PRISMA

## Resultados

Los resultados de la revisión sistemática evidenciaron que la literatura científica sobre sostenibilidad ambiental y económica de sistemas de tierra y arcilla imprimibles en 3D aún se encuentra en una etapa emergente. A partir del proceso de selección, se incorporaron 9 estudios que respondieron de manera directa o parcial al objetivo de investigación. Estos estudios no abordaron de forma homogénea viviendas completas impresas en 3D, sino que se concentraron principalmente en mezclas imprimibles, morteros híbridos, materiales cementicios de bajo carbono, prototipos de tierra impresa, ensamblajes residenciales y evaluaciones preliminares de ciclo de vida. Esta situación permitió identificar una tendencia clara: la evidencia ambiental es más robusta que la evidencia económica y que la evaluación integral del ciclo de vida.

En términos generales, los estudios incorporados fueron organizados en tres ejes analíticos: indicadores ambientales comparativos, indicadores económicos comparativos y cobertura del ciclo de vida. La mayor concentración de evidencia se ubicó en los indicadores ambientales, con cinco estudios que reportaron datos sobre potencial de calentamiento global, carbono incorporado, emisiones de carbono, demanda energética o potencial de cambio climático. En cambio, solo dos estudios aportaron información económica comparable, principalmente asociada a costos iniciales, costos de materiales o costos relativos de estabilización. Finalmente, dos estudios permitieron analizar la cobertura del ciclo de vida, aunque esta se mantuvo centrada en fases iniciales como extracción, transporte, procesamiento, mezcla e impresión (Ver Tabla 2).

Autor	Sistema evaluado	Indicadores clave	Comparador	Resultado principal	Aporte
Baytak et al., (2024)	Compuestos imprimibles con caliza, arcilla calcinada y grafeno	GWP, huella de carbono, demanda energética	Mezclas imprimibles convencionales con cemento Portland	Reducción aproximada de 31 % en impactos ambientales y mejora de 23 % en resistencia a compresión	Evidencia ambiental cuantitativa sobre materiales imprimibles de bajo carbono.
Faleschini et al., (2023)	Mezclas de tierra imprimibles con suelo local, cal, residuos y fibras naturales	Carbono incorporado, precio/kg, resistencia, retracción	Comparación entre mezclas de tierra imprimibles	Mezcla con cal y sisal: 0.05239 kg CO <sub>2</sub> eq/kg y 0.137 €/kg; mezcla optimizada: 11.04 MPa de resistencia a compresión	Relaciona composición, carbono incorporado y desempeño mecánico en mezclas de tierra imprimibles.
Jin et al., (2024)	Concreto imprimible 3D basado en LC3	Cambio climático, GWP, indicadores	Material imprimible convencional de 30 MPa	Reducción de 36 % en Quebec y 46 % en	Aporta ACV cradle-to-gate sobre reducción de impacto mediante

Autor	Sistema evaluado	Indicadores clave	Comparador	Resultado principal	Aporte
		midpoint y endpoint		Francia en el indicador de cambio climático	arcilla calcinada y caliza.
Shen et al., (2025)	Concreto de tierra impreso 3D con arcilla excavada y geopolímero	Emisiones de carbono, intensidad de carbono, conductividad térmica	Concreto impreso 3D	Mejora de resistencia por solidificación geopolimérica y evaluación comparativa de emisiones frente a 3DPC	Evidencia directa sobre tierra/arcilla excavada impresa en 3D y desempeño ambiental.
Tinoco et al., (2025)	Morteros imprimibles con tierra fina, cemento Portland y ceniza volante	Potencial de cambio climático, kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> , resistencia, reología	Morteros imprimibles cementicios reportados en literatura	Reducción de 355.1 a 243.1 kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> ; 32 % menos impacto y por debajo de 500–583 kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup>	Es la evidencia ambiental más sólida por integrar tierra, ceniza volante, reducción de cemento y ACV.

**Tabla 2.** Indicadores ambientales corporativos

Los resultados ambientales permiten observar que la reducción del contenido de cemento Portland fue el mecanismo más recurrente para disminuir los impactos ambientales. Esta reducción se logró mediante el uso de arcilla calcinada, caliza, tierra fina, ceniza volante, geopolímeros o materiales locales. En ese sentido, los estudios no solo reportaron mejoras ambientales, sino también intentaron equilibrar dichas mejoras con requisitos de printabilidad, resistencia mecánica y estabilidad dimensional.

El estudio de Tinoco et al., (2025) fue particularmente relevante, debido a que integró tierra fina, cemento Portland y ceniza volante en morteros imprimibles, reportando una reducción del potencial de cambio climático de 355.1 a 243.1 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>3</sup>. Este resultado fue inferior a los valores reportados para morteros imprimibles cementicios

convencionales, lo que evidencia que las mezclas híbridas con alto contenido de tierra pueden constituir una alternativa ambientalmente competitiva. De forma complementaria, Shen et al., (2025) aportaron evidencia sobre concreto de tierra impreso en 3D con arcilla excavada y geopolímero, fortaleciendo la discusión sobre el uso de recursos locales y materiales de menor impacto.

No obstante, los resultados también mostraron una limitación importante: la mayoría de los estudios ambientales se concentró en evaluaciones cradle-to-gate o en indicadores de etapa temprana. Por tanto, aunque existe evidencia favorable sobre la reducción de carbono incorporado y emisiones iniciales, todavía no puede afirmarse que las viviendas de arcilla impresas en 3D sean ambientalmente superiores en todo su ciclo de vida. Esta conclusión requiere estudios que incorporen

operación, mantenimiento, durabilidad, reparación, demolición, reutilización y disposición final.

Autor/año	Sistema evaluado	Indicadores clave	Comparador	Resultado principal	Aporte
<b>Bradford et al., (2025)</b>	Ensamblajes residenciales impresos 3D	Costo inicial, costo por resistencia, carbono, energía embebida	Muro convencional de entramado de madera	Algunos materiales redujeron hasta 47 % el costo, 72 % la huella de carbono y 61 % la energía embebida; aun así, el muro de madera fue hasta 55 % más barato	Principal evidencia económica comparativa a escala de muro residencial.
<b>Abdelaal et al., (2025)</b>	Tierra apisonada estabilizada con bioaglutinantes	Costo de aglutinante, dosificación, temperatura de procesamiento	Estabilización con cemento	Cola animal: 10 kg/t y 150 AUD; cemento: 140 kg/t y 70 AUD. Menor dosificación, pero mayor costo unitario	Evidencia económica indirecta sobre estabilización de sistemas de tierra; debe usarse como apoyo complementario.

**Tabla 3.** Indicadores económicos comparativos

El estudio de Bradford et al., (2025) constituyó la evidencia económica más sólida, ya que comparó ensamblajes residenciales impresos en 3D frente a un muro convencional de entramado de madera. Sus resultados indicaron que algunas alternativas imprimibles redujeron costos, huella de carbono y energía embebida respecto a otras formulaciones de impresión 3D. Sin embargo, el muro convencional de madera continuó siendo más barato y con menor huella de carbono en determinados escenarios. Este hallazgo es importante porque evita una lectura simplificada de la impresión 3D como tecnología automáticamente sostenible o económicamente superior.

Por su parte, Abdelaal et al., (2025) aportaron evidencia económica indirecta sobre tierra estabilizada mediante bioaglutinantes. Aunque el estudio no evaluó impresión 3D, sus datos

permitieron discutir costos relativos de estabilización, dosificación de materiales y temperatura de procesamiento. En ese sentido, su aporte debe considerarse complementario, útil para comprender la economía de materiales de tierra estabilizada, pero insuficiente para generalizar conclusiones sobre viviendas impresas en 3D.

En conjunto, los resultados de la PI2 muestran que la literatura aún no desarrolla una evaluación económica completa. Los costos de operación, mantenimiento, reparación, durabilidad y fin de vida permanecen escasamente documentados. Esto constituye una brecha crítica, ya que una vivienda impresa en 3D podría presentar ventajas iniciales en reducción de mano de obra o desperdicio, pero dichas ventajas deben contrastarse con costos de equipos, energía de impresión, estabilizantes,

transporte, capacitación técnica, mantenimiento y vida útil del sistema constructivo.

Autor	Sistema evaluado	Fases cubiertas	Fases débiles o ausentes	Resultado principal	Aporte
Curth et al., (2024)	Impresión 3D con tierra local	Abastecimiento local, procesamiento, mezcla, fabricación robótica, prototipado y carbono incorporado	Operación, mantenimiento, durabilidad, erosión, intrusión de agua y fin de vida	Tierra impresa 3D: 0.006 kg CO <sub>2</sub> /kg, menor que tierra apisonada, CEB, CMU, ladrillo cocido y concreto impreso 3D	Evidencia más fuerte para ciclo de vida, aunque todavía limitada a fases iniciales y prototipado.
Perrot et al., (2024)	Revisión sobre tierra, geopolímeros, yeso y cementos bajos en carbono para impresión 3D	Extracción local, transporte, procesamiento robotizado, aditivos, estabilizantes e impresión	ACV completo de vivienda, operación, mantenimiento, reutilización y fin de vida	Advierte que el procesamiento robotizado, la resolución de impresión, el transporte y los estabilizantes pueden aumentar la huella de carbono	Apoyo analítico para identificar brechas y evitar asumir que la impresión 3D con tierra es automáticamente sostenible.

**Tabla 4.** Cobertura del ciclo de vida

Curth et al., (2024) representó el estudio más relevante para esta pregunta, debido a que conectó el uso de tierra local, procesamiento circular, fabricación robótica, prototipado y evaluación ambiental. El valor reportado de 0.006 kg CO<sub>2</sub>/kg para tierra impresa en 3D permitió comparar esta alternativa con otros sistemas constructivos, como tierra apisonada, bloques de tierra comprimida, ladrillo cocido, mampostería de concreto y concreto impreso en 3D. Este resultado refuerza el potencial ambiental de la tierra impresa, aunque todavía desde una perspectiva parcial del ciclo de vida.

Perrot et al., (2024), aunque corresponde a una revisión técnica y no a un estudio empírico primario, permitió interpretar críticamente las fases cubiertas y las brechas existentes. Su aporte principal

consistió en advertir que la tierra no es automáticamente sostenible cuando se digitaliza el proceso constructivo. La huella ambiental puede incrementarse por el procesamiento robotizado, la resolución de impresión, el transporte de materiales, la incorporación de aditivos y el uso de estabilizantes. Esta observación es clave porque desplaza el análisis desde el material aislado hacia el sistema constructivo y sus condiciones de producción.

En consecuencia, la PI3 evidencia una brecha metodológica importante: la literatura aún no ofrece suficientes evaluaciones cradle-to-grave de viviendas de tierra o arcilla impresas en 3D. La mayoría de los estudios se limita a las etapas previas a la puesta en uso del edificio, lo cual restringe la

posibilidad de evaluar integralmente la sostenibilidad. Para avanzar en este campo, se requieren estudios que incorporen escenarios de durabilidad, mantenimiento, desempeño térmico en operación, reparación, reciclabilidad, reuso del material y disposición final.

### Discusión de resultados

Los resultados obtenidos permitieron sostener que la comparación entre viviendas de arcilla impresas en 3D y sistemas constructivos convencionales aún no puede entenderse como una relación cerrada ni definitivamente favorable a una tecnología sobre otra. Más bien, la evidencia revisada mostró un campo todavía en formación, donde los indicadores ambientales presentan mayor desarrollo que los indicadores económicos y que las evaluaciones de ciclo de vida completo. Esta situación coincide con lo señalado por Gomaa et al., (2022), quienes advirtieron que la manufactura digital con materiales terrosos todavía se encuentra condicionada por vacíos técnicos vinculados con la estandarización de mezclas, la durabilidad y el desempeño en condiciones reales de uso.

De manera similar, Rocha et al., (2023) y Yin et al., (2023) sostuvieron que la impresión 3D con arcilla y tierra posee un alto potencial para la construcción sostenible, aunque su consolidación científica depende de estudios más robustos sobre resistencia al agua, comportamiento higrotérmico, estabilidad dimensional y evaluación ambiental

integral. En ese sentido, los hallazgos de esta revisión convergen con la literatura previa al mostrar que la sostenibilidad de la arcilla impresa en 3D no depende únicamente del origen natural del material. La verdad es que el beneficio ambiental se define, sobre todo, por la manera en que la arcilla se procesa, estabiliza, transporta, imprime, utiliza y, finalmente, se reincorpora o descarta.

El principal resultado ambiental de esta revisión fue la mayor disponibilidad de indicadores asociados con potencial de calentamiento global, carbono incorporado, emisiones de CO<sub>2</sub> y demanda energética. Esta tendencia converge con el estudio de Alhumayani et al., (2020), quienes demostraron que la impresión 3D con cob puede presentar menores impactos ambientales que la impresión 3D con concreto, especialmente cuando se reduce la dependencia de mezclas cementicias. En la misma línea, Tinoco et al., (2025) reportaron que una mezcla imprimible compuesta por 60 % de tierra fina, 30 % de cemento Portland y 10 % de ceniza volante redujo el potencial de cambio climático de 355.1 a 243.1 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>3</sup>, ubicándose por debajo de los valores reportados para morteros imprimibles cementicios convencionales. Este resultado refuerza una idea importante: disminuir el contenido de cemento constituye una estrategia central para mejorar el desempeño ambiental de los materiales imprimibles. Sin embargo, también debe interpretarse con cautela, porque la mayoría de los estudios revisados trabajó a escala de mezcla,

mortero o prototipo, y no necesariamente a escala de vivienda completa.

La evidencia ambiental también mostró que el uso de arcilla calcinada, caliza, ceniza volante, geopolímeros, tierra fina y materiales locales puede reducir de manera significativa los impactos asociados con la impresión 3D constructiva. Baytak et al., (2024) y Jin et al., (2024) confirmaron que las formulaciones basadas en arcilla calcinada y caliza permiten disminuir el impacto climático respecto de mezclas imprimibles convencionales con alto contenido de cemento Portland.

Estos hallazgos son consistentes con la literatura sobre cementos de bajo carbono, aunque divergen parcialmente del ideal de una vivienda estrictamente “de arcilla”, ya que algunos sistemas analizados todavía dependen de componentes cementicios o activadores alcalinos. Esta diferencia resulta importante porque evidencia que la sostenibilidad ambiental puede mejorar mediante sustituciones parciales del cemento, pero no siempre implica una transición plena hacia sistemas terrosos no estabilizados. Por ello, el beneficio ambiental no debe atribuirse automáticamente a la impresión 3D, sino a la combinación concreta entre material, dosificación, proceso de impresión y fuente energética utilizada.

Los resultados de Curth et al., (2024) ofrecieron una de las evidencias más cercanas al objetivo de esta revisión, al reportar un carbono

incorporado de 0.006 kg CO<sub>2</sub>/kg para tierra impresa en 3D, valor menor que los registrados para tierra apisonada, bloques de tierra comprimida estabilizados, ladrillo cocido, mampostería de concreto y concreto impreso en 3D.

Este hallazgo coincide con Arduin et al., (2022), quienes destacaron que las técnicas de construcción con tierra suelen presentar impactos ambientales reducidos debido al bajo procesamiento industrial del material y a su potencial de abastecimiento local. No obstante, Perrot et al., (2024) aportaron una advertencia necesaria: cuando la tierra se adapta a procesos robotizados, su huella ambiental puede incrementarse por el consumo energético de la impresión, la resolución del proceso, el transporte del material y la incorporación de aditivos o estabilizantes. Esta divergencia permite precisar una conclusión relevante: la construcción con tierra puede ser ambientalmente ventajosa, pero la digitalización del proceso introduce nuevas cargas que deben medirse con rigor y no asumirse como marginales.

En cuanto a la dimensión económica, los resultados fueron más limitados y fragmentarios. Bradford et al., (2025) constituyeron la evidencia más sólida al comparar ensamblajes residenciales impresos en 3D con un muro convencional de entramado de madera. Sus resultados mostraron que algunas alternativas imprimibles redujeron costos, huella de carbono y energía embebida respecto de

otras formulaciones de impresión 3D. Sin embargo, el muro de madera continuó siendo más barato y con menor huella de carbono en determinados escenarios. Este resultado diverge de los hallazgos de Abdalla et al., (2021), quienes reportaron reducciones importantes en costos de capital y potencial de calentamiento global para una vivienda impresa en 3D frente a una construcción convencional de concreto.

La diferencia entre ambos resultados puede explicarse por el tipo de sistema convencional utilizado como referencia, el contexto geográfico, la unidad funcional, el tipo de material imprimible y el alcance del análisis. Comparar una vivienda impresa con una alternativa de concreto puede favorecer más a la impresión 3D que compararla con sistemas livianos de madera, especialmente en contextos donde la madera tiene una baja huella ambiental y una cadena de suministro consolidada. Es decir, el punto de comparación cambia mucho el resultado, casi como ocurre cuando se evalúa el rendimiento de un vehículo: no es lo mismo compararlo con uno pesado y antiguo que con uno liviano, eficiente y bien adaptado a su entorno.

La escasez de evidencia económica impide afirmar que las viviendas de arcilla impresas en 3D sean, en términos generales, más económicas que los métodos convencionales. Abdelaal et al., (2025) aportaron información útil sobre costos relativos de estabilización en sistemas de tierra, pero su estudio

no evaluó impresión 3D ni viviendas completas. Por ello, su valor debe entenderse como evidencia complementaria sobre economía de materiales, no como prueba directa de viabilidad habitacional.

Esta limitación coincide con Khosravani & Haghghi (2022), quienes señalaron que la impresión 3D puede reducir costos laborales, desperdicio y tiempos de ejecución, pero también introduce costos asociados con maquinaria, mantenimiento, energía, capacitación técnica y control de calidad. En consecuencia, la ventaja económica de la impresión 3D con arcilla dependerá de condiciones locales muy concretas: disponibilidad del suelo, necesidad de estabilizantes, escala del proyecto, costo de la energía, amortización del equipo, mano de obra especializada y exigencias normativas.

El análisis de ciclo de vida mostró que la literatura se concentra principalmente en las etapas iniciales del sistema constructivo, como extracción o abastecimiento de materiales, preparación de mezclas, transporte, procesamiento e impresión. Esta concentración coincide con el predominio de estudios cradle-to-gate y cradle-to-site, pero deja insuficientemente desarrolladas las fases de operación, mantenimiento, reparación, durabilidad, demolición, reutilización y fin de vida.

Salandin et al., (2022) demostraron que una fachada impresa en 3D puede ofrecer un buen desempeño térmico, pero al mismo tiempo presentar

mayores emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente que una fachada convencional de bloques de concreto debido al alto contenido cementicio de la mezcla. Este antecedente resulta especialmente relevante porque confirma que el desempeño operativo o térmico no siempre compensa los impactos incorporados en la etapa de producción. En el caso de las viviendas de arcilla impresas en 3D, todavía falta determinar si sus posibles ventajas higrotérmicas durante la vida útil logran equilibrar o superar las cargas energéticas y materiales asociadas con la fabricación digital.

Una limitación metodológica importante de esta revisión fue el reducido número de estudios incluidos. Aunque se identificaron 9 artículos pertinentes, el corpus evidenció que el campo todavía es emergente y que la evidencia disponible no cubre de manera equilibrada las tres preguntas de investigación. La PI1 contó con mayor respaldo, porque varios estudios reportaron indicadores ambientales cuantitativos. En cambio, la PI2 y la PI3 presentaron menor densidad de evidencia.

Esta distribución pudo afectar la interpretación de los resultados, ya que permitió formular conclusiones relativamente sólidas sobre la reducción de impactos ambientales en materiales imprimibles, pero no permitió establecer conclusiones igualmente firmes sobre costos de ciclo de vida o sostenibilidad integral de viviendas completas. Por ello, los hallazgos deben entenderse

como una síntesis crítica de la evidencia disponible, no como una demostración definitiva de superioridad ambiental y económica de la arcilla impresa en 3D frente a todos los sistemas convencionales.

Otra limitación relevante fue la heterogeneidad de unidades funcionales, escalas de análisis y sistemas comparadores. Algunos estudios evaluaron mezclas por kilogramo, otros morteros por metro cúbico, prototipos de muro, ensamblajes residenciales o materiales cementicios con componentes de arcilla calcinada. Esta diversidad dificultó la comparación directa entre resultados, especialmente cuando los estudios no compartieron límites de sistema, supuestos energéticos, vida útil, criterios de durabilidad ni escenarios de fin de vida.

Además, varios artículos incorporados no evaluaron viviendas completas, sino materiales o componentes con potencial constructivo. Esta condición puede limitar la generalización de los resultados al ámbito habitacional, porque una vivienda implica interacciones entre estructura, envolvente, instalaciones, desempeño térmico, mantenimiento, habitabilidad y normativa local que no siempre quedan reflejadas en ensayos de laboratorio o prototipos parciales.

También debe considerarse como limitación contextual la dependencia de condiciones locales. La sostenibilidad de la arcilla impresa en 3D puede variar significativamente según el tipo de suelo

disponible, la distancia de transporte, la necesidad de corrección granulométrica, el uso de fibras, cales, cementos, geopolímeros o aditivos, así como el tipo de energía utilizada por los equipos de impresión.

Un sistema ambientalmente favorable en un contexto con suelo local adecuado y energía de baja emisión podría no ser igualmente favorable en otro donde la arcilla requiera procesamiento intensivo, transporte prolongado o estabilización con materiales de alta huella ambiental. Esta variabilidad explica por qué algunos estudios convergen en el potencial de reducción de carbono, mientras otros advierten que la impresión 3D puede incrementar impactos si depende de mezclas cementicias, alta resolución de impresión o consumo energético elevado.

A partir de estas limitaciones, futuras investigaciones deberían avanzar hacia evaluaciones cradle-to-grave de viviendas o módulos habitacionales completos impresos con arcilla, tierra o cob. Estos estudios deberían incorporar una unidad funcional comparable, como una vivienda de determinada área rentable, vida útil estimada y desempeño térmico mínimo, de modo que la comparación con sistemas convencionales sea metodológicamente más consistente.

También sería necesario incluir fases de operación y mantenimiento, especialmente por la importancia del comportamiento higrotérmico, la resistencia al agua, la erosión superficial, la

fisuración por retracción y la necesidad de reparaciones periódicas en materiales terrosos. Sin esta información, el análisis ambiental seguirá concentrado en impactos incorporados y no en el desempeño integral durante el uso real de la vivienda.

Asimismo, se recomienda desarrollar estudios económicos que integren costos de construcción, operación, mantenimiento, reparación, reemplazo de componentes y fin de vida. La literatura debería superar la comparación limitada de costos iniciales y avanzar hacia análisis de costo del ciclo de vida. Para ello, sería conveniente considerar escenarios diferenciados de producción: impresión in situ, prefabricación, uso de mano de obra local, alquiler o adquisición de equipos, consumo energético, logística de materiales, disponibilidad de estabilizantes y capacitación técnica. Este tipo de análisis permitiría determinar si la impresión 3D con arcilla es económicamente competitiva solo en prototipos experimentales o si puede sostenerse en proyectos habitacionales reales y replicables.

Finalmente, futuras investigaciones deberían estandarizar la caracterización de mezclas imprimibles con tierra y arcilla, incorporando indicadores comunes de printabilidad, resistencia mecánica, conductividad térmica, absorción de agua, durabilidad, retracción y carbono incorporado. También sería valioso realizar estudios comparativos en diferentes climas, especialmente

en zonas áridas, tropicales, frías o húmedas, donde el desempeño de la arcilla puede variar de manera significativa.

La articulación entre ACV, análisis económico, simulación energética y monitoreo de prototipos habitados permitiría superar la actual fragmentación de la evidencia. Desde esta perspectiva, la contribución principal de esta revisión consiste en mostrar que la arcilla impresa en 3D posee un potencial real para reducir impactos ambientales, pero que su consolidación como alternativa sostenible frente a sistemas convencionales dependerá de evaluaciones más integrales, comparables y situadas en condiciones reales de construcción y uso.

### Conclusiones

Los resultados de esta revisión sistemática evidenciaron que la sostenibilidad ambiental de los sistemas de tierra y arcilla imprimibles en 3D se encuentra mejor documentada que su sostenibilidad económica y que su evaluación integral del ciclo de vida. Los estudios revisados mostraron que la reducción del contenido de cemento Portland, la incorporación de tierra fina, arcilla calcinada, caliza, ceniza volante, geopolímeros y materiales locales puede disminuir de manera significativa los impactos ambientales asociados con la construcción aditiva.

En particular, los hallazgos de Tinoco et al., (2025), Shen et al., (2025), Curth et al., (2024), Jin et al., (2024) y Baytak et al., (2024) permitieron identificar reducciones relevantes en indicadores como potencial de cambio climático, carbono incorporado, emisiones de CO<sub>2</sub> y demanda energética. Sin embargo, también se constató que la mayoría de los estudios se concentra en mezclas, morteros, prototipos o ensamblajes parciales, y no en viviendas completas evaluadas bajo condiciones reales de uso.

Esta contribución resulta importante porque ordena críticamente un campo emergente y demuestra que el potencial ambiental de la arcilla impresa en 3D depende menos de la tecnología en sí misma y más de la composición del material, el origen local de los insumos, el tipo de estabilizante, el consumo energético del proceso y los límites metodológicos del análisis.

En respuesta al objetivo de comparar los indicadores de sostenibilidad ambiental y económica reportados en la literatura entre viviendas de arcilla impresas en 3D y viviendas construidas con métodos convencionales, considerando el ciclo de vida completo, este artículo de revisión sistemática permitió concluir que la evidencia disponible es prometedora, pero todavía insuficiente para afirmar una superioridad ambiental y económica absoluta de la impresión 3D con arcilla frente a todos los sistemas convencionales.

En la dimensión ambiental, los estudios muestran una tendencia favorable cuando se reducen los componentes cementicios y se emplean materiales terrosos o residuos de baja huella, como se observa en los resultados de Curth et al., (2024) y Tinoco et al., (2025). No obstante, la comparación económica sigue siendo limitada, pues solo algunos estudios, como Bradford et al., (2025), incorporan costos iniciales o costos de materiales, mientras que los costos de operación, mantenimiento, reparación y fin de vida permanecen escasamente documentados.

Asimismo, la cobertura del ciclo de vida se concentra principalmente en etapas iniciales — extracción, procesamiento, mezcla, transporte e impresión—, dejando poco desarrolladas las fases de uso, mantenimiento, durabilidad, reutilización y disposición final. Por ello, la evidencia permite sostener que la arcilla impresa en 3D tiene potencial como alternativa sostenible, pero dicho potencial aún requiere validación mediante evaluaciones cradle-to-grave aplicadas a viviendas completas.

Como reflexión final, esta revisión muestra que el debate sobre la sostenibilidad de la vivienda de arcilla impresa en 3D debe superar las afirmaciones generales sobre bajo impacto y avanzar hacia comparaciones más integrales, verificables y contextualizadas. Futuros estudios deberían emplear unidades funcionales comparables, como vivienda por metro cuadrado

útil durante una vida útil definida, incorporar análisis de costo del ciclo de vida, evaluar el desempeño térmico en operación y documentar la durabilidad de los materiales terrosos frente a humedad, erosión, retracción, fisuración y mantenimiento periódico.

También resulta necesario estandarizar los indicadores de printabilidad, resistencia mecánica, carbono incorporado, energía embebida, consumo de recursos y costos constructivos, de modo que los resultados puedan compararse entre regiones, materiales y sistemas constructivos. En términos prácticos, los hallazgos sugieren que la impresión 3D con arcilla puede contribuir a la construcción sostenible cuando aprovecha suelos locales, minimiza estabilizantes de alta huella ambiental, reduce transporte y mantiene un desempeño estructural e higrotérmico adecuado. Sin embargo, su consolidación como alternativa habitacional dependerá de investigaciones futuras que integren análisis ambiental, económico, técnico y normativo bajo condiciones reales de construcción y uso.

## Referencias

- Abdalla, H., Fattah, K. P., Abdallah, M., & Al-Tamimi, A. K. (2021). Environmental footprint and economics of a full-scale 3D-printed house. *Sustainability*, 13(21), Article 11978. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.3390/su132111978>
- Abdallah, Y. K. (2024). Impresión 3D en arcilla de columnas biorreceptivas texturizadas: Hacia una tecnología de construcción democrática, sostenible y emergente. *Cuadernos del Centro de*

- Estudios de Diseño y Comunicación*, (220). Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.18682/cdc.vi220.11145>
- Abdelaal, A., Ma, J., Gomaa, M., Giustozzi, F., & Xie, Y. M. (2025). Stabilizing rammed earth using xanthan gum or animal glue as bio-binder. *Frontiers in Built Environment*, 11, Article 1535947. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1535947>
- Alhumayani, H., Gomaa, M., Soebarto, V., & Jabi, W. (2020). Environmental assessment of large-scale 3D printing in construction: A comparative study between cob and concrete. *Journal of Cleaner Production*, 270, Article 122463. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122463>
- Arduin, D., Caldas, L. R., Paiva, R. de L. M., & Rocha, F. (2022). Life cycle assessment (LCA) in earth construction: A systematic literature review considering five construction techniques. *Sustainability*, 14(20), Article 13228. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.3390/su142013228>
- Baytak, T., Gdeh, T., Jiang, Z., Arce, G., Colosi, L. M., & Ozbulut, O. E. (2024). Rheological, mechanical, and environmental performance of printable graphene-enhanced cementitious composites with limestone and calcined clay. *Journal of Building Engineering*, 97, Article 110673. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110673>
- Bradford, K., Gentry, R., Ben-Alon, L., & Kurtis, K. (2025). Construction 3D printing material selection: Minimizing cost and carbon footprint of residential wall assemblies. *Construction and Building Materials*, 493, Article 143150. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143150>
- Curth, A., Pearl, N., Castro-Salazar, A., Mueller, C., & Sass, L. (2024). 3D printing earth: Local, circular material processing, fabrication methods, and life cycle assessment. *Construction and Building Materials*, 421, Article 135714. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135714>
- Faleschini, F., Trento, D., Masoomi, M., Pellegrino, C., & Zanini, M. A. (2023). Sustainable mixes for 3D printing of earth-based constructions. *Construction and Building Materials*, 398, Article 132496. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132496>
- Gomaa, M., Jabi, W., Soebarto, V., & Xie, Y. M. (2022). Digital manufacturing for earth construction: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 338, Article 130630. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130630>
- Jin, W., Ouellet-Plamondon, C., Caron, JF. (2025). Optimización multiobjetivo de un mortero LC3 sostenible para impresión 3D. En: Francis, A., Miresco, E., Melhado, S. (eds) Avances en tecnología de la información en ingeniería civil y de la construcción. ICCCBE 2024. Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 629. Springer, Cham. Documento en línea. Disponible [https://doi.org/10.1007/978-3-031-87364-5\\_35](https://doi.org/10.1007/978-3-031-87364-5_35)
- Khosravani, M. R., & Haghighi, A. (2022). Large-scale automated additive construction: Overview, robotic solutions, sustainability, and future prospect. *Sustainability*, 14(15), Article 9782. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.3390/su14159782>
- Perrot, A., Jacquet, Y., Caron, J. F., Mesnil, R., Ducoulombier, N., De Bono, V., Sanjayan, J., Ramakrishnan, S., Kloft, H., Gossler, J., Muthukrishnan, S., Mechtcherine, V., Wangler, T., Provis, J. L., Dörfler, K., Krakovska, E., Roussel, N., & Keita, E. (2024). Snapshot on 3D printing with alternative binders and materials: Earth, geopolymers, gypsum and low carbon concrete. *Cement and Concrete Research*, 185, Article 107651. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107651>

- Rocha, D., Faria, P., & Lucas, S. S. (2023). Additive manufacturing of earth-based materials: A literature review on mortar composition, extrusion, and processing earth. *Materials*, *17*(1), Article 202. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.3390/ma17010202>
- Salandin, A., Quintana-Gallardo, A., Gómez-Lozano, V., & Guillén-Guillamón, I. (2022). The first 3D-printed building in Spain: A study on its acoustic, thermal and environmental performance. *Sustainability*, *14*(20), Article 13204. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.3390/su142013204>
- Shen, J., Ye, T., Xiao, J., & Li, S. (2025). Mechanical and thermal properties of 3D printed earth concrete solidified by geopolymers: A study of utilizing excavated clay. *Journal of Building Engineering*, *107*, Article 112705. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112705>
- Tinoco, M. P., Paiva, R. de L. M., Andrade, L. D. de, Reales, O. A. M., & Toledo Filho, R. D. (2025). Hybrid 3D printable mixtures incorporating fine earth, Portland cement, and fly ash: A sustainable alternative to cement-intensive systems. *Low-Carbon Materials and Green Construction*, *3*, Article 27. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.1007/s44242-025-00089-3>
- Yin, X., Guo, C., Sun, B., Chen, H., Wang, H., & Li, A. (2023). The state of the art in digital construction of clay buildings: Reviews of existing practices and recommendations for future development. *Buildings*, *13*(9), Article 2381. Documento en línea. Disponible <https://doi.org/10.3390/buildings13092381>