

Materialidad: materialidad sostenible

IMPLICACIONES DE ESTRATEGIAS DE ECONOMÍA CIRCULAR EN EMISIONES DE GASES INVERNADERO PARA LA VIVIENDA INFORMAL EN LIMA¹

Jaime Sarmiento Pastor. Universidad de Lima, Perú.

jsarmien@ulima.edu.pe. 992 403 864

Andrés Lira Chirif. Universidad de Lima, Perú.

amlira@ulima.edu.pe. 997936236.

Daniel Rondinel Oviedo. McGill University, Canadá.

Naomi Keena. McGill University, Canadá.

Anna Dyson. Yale Center for Ecosystems + Architecture, USA

Marco Raugei. Oxford Brookes University, UK.

Columbia University, USA.

Alejandra Acevedo De Los Ríos. Yale Center for Ecosystems + Architecture, USA.

University of Louvain, Bélgica.

Resumen

La urbanización acelerada en países en desarrollo ha impulsado la proliferación de asentamientos informales, los cuales concentran altos niveles de vulnerabilidad social y ambiental. En Lima, cerca del 50 % del crecimiento urbano ocurre bajo modalidades de autoconstrucción incremental, caracterizadas por procesos de consolidación progresiva que intensifican el uso de recursos y generan impactos ambientales acumulativos. Este estudio aplica la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (LCA) para evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el consumo de agua y el uso de energía fósil a lo largo de las cuatro fases de consolidación de la vivienda informal: inicio, desarrollo, culminación y consolidación. Asimismo, se modelan tres escenarios de fin de vida de materiales, vertedero, reciclaje y deconstrucción selectiva, con el fin de explorar el potencial de estrategias circulares. Los resultados muestran que la consolidación final alcanza 183 tCO₂-eq por unidad, mientras que la deconstrucción selectiva permite reducciones del 81 % en emisiones, 82 % en consumo de agua y 80 % en energía fósil en comparación con el vertedero. Estos hallazgos evidencian la urgencia de integrar principios de economía circular en las políticas de vivienda social y urbana, proponiendo un marco de intervención que promueva la gestión sostenible de materiales y la reducción de impactos en contextos de vulnerabilidad.

Palabras clave

Asentamientos informales; Evaluación de ciclo de vida; Economía circular; Vivienda informal; Emisiones de carbono

¹ Este texto constituye un resumen de la investigación titulada "Implications of Circular Strategies on Energy, Water, and GHG Emissions in Informal Housing in Lima" publicada en *Energy & Buildings* (Sarmiento-Pastor et al., 2025).

Abstract

Rapid urbanization in developing countries has led to the expansion of informal settlements, which concentrate high levels of social and environmental vulnerability. In Lima, nearly 50 % of urban growth occurs through incremental self-construction, characterized by progressive consolidation phases that intensify resource use and generate cumulative environmental impacts. This study applies Life Cycle Assessment (LCA) to evaluate greenhouse gas (GHG) emissions, water consumption, and fossil energy use across four stages of informal housing consolidation: inception, development, completion, and consolidation. Additionally, three end-of-life scenarios, landfilling, recycling, and selective deconstruction, were modeled to assess the potential of circular strategies. Results show that a fully consolidated unit reaches 183 tCO₂-eq, while selective deconstruction reduces impacts by up to 81% in carbon emissions, 82% in water use, and 80% in fossil energy compared to landfilling. These findings highlight the pressing need to integrate circular economy principles into housing and urban policy, promoting sustainable material management and reducing impacts in vulnerable contexts.

Keywords

Informal settlements; Life Cycle Assessment; Circular economy; Informal housing; Carbon emissions

1. Introducción

La urbanización acelerada en países de ingresos bajos y medios ha impulsado la expansión de asentamientos informales (AI) que hoy albergan a más de mil millones de personas, aproximadamente un tercio de la población urbana del mundo en desarrollo, y que se caracterizan por su crecimiento continuo, autoconstrucción, inestabilidad jurídica y altos niveles de pobreza (Turner, 1968; UN-Habitat, 2020). Estos territorios, a la vez dinámicos y vulnerables, se han convertido en la principal vía de acceso a vivienda para amplias capas de población migrante en ciudades del Sur Global, sosteniendo su crecimiento mediante el uso intensivo de materiales de construcción adquiridos bajo lógicas predominantemente lineales de extracción, uso y desecho (Calderón Cockburn, 2016; Kamalipour & Dovey, 2019)

En Lima Metropolitana, los AI exhiben patrones espaciales complejos: ocupan laderas, riberas y suelos marginales, generando presiones sobre la movilidad, el acceso a servicios, la densidad urbana y la sostenibilidad ambiental (Driant & Riofrío, 1987; Williams et al., 2019). A estos impactos locales se suman externalidades regionales vinculadas a la producción de insumos, por ejemplo, la extracción de arcillas para ladrillo o las conexiones con la deforestación asociada a estructuras de madera, lo que revela cadenas de abastecimiento distantes y efectos territoriales amplificados (Ricou, 1988; Zolezzi Chocano et al., 2005). La reducción de la vulnerabilidad, particularmente frente a desastres, exige políticas de regularización y planificación integrales, pero también una atención explícita a la huella material de la vivienda y a su fase de fin de vida, donde las estrategias de diseño circular pueden desempeñar un papel decisivo (Eberhardt et al., 2019; Lokko et al., 2024).

Una característica definitoria de la vivienda informal limeña es su condición incremental y la autoconstrucción por etapas, que reconfiguran el uso de materiales y las tipologías a lo largo de décadas (Burga, 2006; Pena-Guillen & Murakami, 2017). La consolidación habitacional transita, de manera típica, por cuatro fases: (1) inicio/temporal (refugios ligeros de esteras o módulos de madera); (2) desarrollo/emergente (incorporación de muros portantes de ladrillo y primeros servicios básicos); (3) culminación/parcialmente consolidada (mejora de distribución espacial y envolventes más durables); y (4) consolidación/expandida (crecimientos verticales hasta tres niveles y mayor dotación de servicios). Este proceso supone reemplazos materiales sucesivos, por ejemplo, calamina y madera por concreto y ladrillo, a medida que aumentan la estabilidad de tenencia y la capacidad de inversión de los hogares, con la consecuente intensificación de la carga ambiental encarnada por unidad construida (Tamura et al., 2014).

El patrón lineal de aprovisionamiento y disposición de materiales, que en muchos casos culmina en vertederos formales o informales, se traduce en ineficiencias sistémicas: altas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a la producción de cemento, acero y ladrillo; uso significativo de energía fósil a lo largo de las cadenas de suministro; y consumos relevantes de agua incorporada (Chen et al., 2022; Dewi et al., 2025). La expansión por etapas incorpora además reemplazos y demoliciones parciales que elevan el volumen total de materiales empleados respecto de una construcción planificada única, exacerbando la presión sobre recursos (Atmaca, 2016).

Pese a su magnitud urbana, la literatura técnica y las políticas han tendido a privilegiar el desempeño operacional (energía en uso) por encima de la carga embebida (extracción, fabricación, transporte, montaje y fin de vida de materiales) (Hauschild et al., 2018) (Hauschild et al., 2018). En contextos donde los edificios mejoran su eficiencia operativa, la fracción embebida adquiere un peso relativo creciente y demanda metodologías de evaluación adaptadas a las especificidades de la autoconstrucción incremental (Gorgolewski, 2006). Por ello, resulta pertinente circunscribir el análisis al ciclo de vida “de la cuna a la tumba”, incorporando explícitamente la fase de fin de vida y sus alternativas de gestión.

En este marco, la presente investigación plantea como objetivo general cuantificar los impactos ambientales embebidos de la vivienda informal en Lima a lo largo de sus cuatro etapas de consolidación y evaluar el potencial de mitigación asociado a estrategias de economía circular en el fin de vida de los materiales. Para ello se modelan tres escenarios mutuamente excluyentes: (S1) deconstrucción selectiva (con posibilidad de reuso y reciclaje allí donde sea tecnológicamente viable), (S2) reciclaje (recolección y procesamiento en bucles cerrados o, cuando no sea posible, *downcycling*) y (S3) disposición en vertedero (peor caso). La asignación de beneficios ambientales se realiza bajo el enfoque de cargas evitadas, ajustado por factores de calidad que reflejan la facilidad de desvío desde el vertedero y las pérdidas por *downcycling* (Nordby et al., 2009; Vefago & Avellaneda, 2013).

La hipótesis de trabajo sostiene que la integración de principios de diseño para la deconstrucción (DfD) y la implementación de cadenas de reuso/reciclaje adaptadas a los materiales dominantes (concreto, ladrillo y acero) pueden producir reducciones sustantivas de GEI, consumo de agua y

uso de energía fósil con respecto al vertido convencional, incluso cuando se apliquen de manera retroactiva sobre edificaciones autoconstruidas (Gorgolewski, 2006; Zhao, 2021).

Este trabajo aporta una lectura sistémica de la vivienda informal limeña al integrar: (i) el carácter incremental de la consolidación (cuatro etapas con acumulación material); (ii) un inventario de materiales derivado de modelación BIM y supuestos de sustitución/reemplazo consistentes con la práctica local; y (iii) un análisis de escenarios de fin de vida que traduce principios de economía circular en métricas comparables de GEI, agua y energía fósil. Con ello, se busca robustecer la toma de decisiones en política pública, programas de mejoramiento barrial y normativas técnicas, orientándolas hacia transiciones factibles desde un modelo lineal a uno circular en la vivienda autoconstruida.

2. Marco teórico y antecedentes

El estudio de la vivienda informal y sus impactos ambientales debe situarse en el marco de dos enfoques conceptuales: la ciudad informal y la economía circular aplicada a la construcción. Estos ejes permiten comprender tanto la dinámica social y espacial de la autoconstrucción como los flujos materiales y energéticos asociados, y las oportunidades de reducir impactos mediante estrategias circulares.

2.1. La ciudad informal como fenómeno socioespacial

Los asentamientos informales son un producto histórico de la migración rural-urbana, la falta de acceso a vivienda social y la debilidad de las políticas urbanas en países del Sur Global. Estos han sido descritos como espacios de “autogestión habitacional”, donde los pobladores priorizan la inmediatez de la ocupación del suelo y la flexibilidad para expandir sus viviendas en el tiempo (Turner, 1968). En el caso de Lima, estudios han documentado cómo la autoconstrucción incremental permitió absorber millones de habitantes migrantes entre las décadas de 1940 y 1980 (Driant & Riofrío, 1987). Estos barrios, si bien precarios en su etapa inicial, constituyen un motor de consolidación urbana y social, aunque al costo de un alto déficit de infraestructura y servicios básicos (UN-Habitat, 2020).

La inseguridad jurídica es otro rasgo común: la ausencia de títulos de propiedad limita la inversión en mejoras estructurales y favorece el uso de materiales provisionales, lo que repercute en la calidad constructiva y en la seguridad ante riesgos naturales (Gilbert, 1996). Además, la localización en terrenos marginales como laderas o riveras expone a las familias a desastres y encarece la provisión de servicios públicos.

2.2. Economía circular y construcción

La economía circular (EC) plantea mantener los materiales en uso durante el mayor tiempo posible, reduciendo residuos y regenerando sistemas naturales (Lieder & Rashid, 2016). En el sector de la construcción, la EC se materializa en prácticas como el diseño para la deconstrucción

(DfD), la modularidad, el uso de materiales reciclados y la creación de mercados secundarios para insumos de construcción (Eberhardt et al., 2019; Gorgolewski, 2006).

A escala global, el sector de la construcción es responsable del 40 % de los materiales extraídos y cerca del 35 % de los residuos sólidos generados (Benachio et al., 2020; Yeheyis et al., 2013). Sin embargo, apenas un 20 % de los residuos de construcción y demolición (RCD) es reciclado en países desarrollados, y el porcentaje es aún menor en contextos emergentes (Huang et al., 2018; Pacheco-Torgal & Ding, 2013). Esto refuerza la necesidad de implementar estrategias de circularidad adaptadas a contextos informales, donde la prioridad suele ser la habitabilidad inmediata más que la sostenibilidad a largo plazo (Lokko et al., 2024).

La vivienda informal en Lima revela un patrón lineal: extracción de recursos → construcción incremental → descarte en botaderos formales o informales. Este ciclo, además de intensivo en energía fósil y agua, no incorpora estrategias de reutilización sistemática, lo que contrasta con la creciente literatura sobre flujos circulares en la construcción formal (Purchase et al., 2021).

Sin embargo, existen prácticas espontáneas de reuso, como la venta de puertas, ventanas o planchas de calamina de segunda mano en mercados barriales, pero carecen de integración institucional y de políticas que las potencien. El reto consiste en formalizar y escalar estas dinámicas para que contribuyan a una reducción significativa de emisiones de carbono y consumo de recursos.

2.3. Brechas de investigación

La literatura sobre EC aplicada a vivienda se ha enfocado en contextos formales, mientras que los asentamientos informales siguen siendo escasamente evaluados desde un enfoque de ciclo de vida. Estudios recientes en Ghana y Senegal muestran que la ausencia de diseño modular y de marcos regulatorios limita el potencial de circularidad en la vivienda social del Sur Global (Lokko et al., 2024). Asimismo, investigaciones previas en Lima sobre vivienda formal sugieren que la incorporación de estrategias de deconstrucción puede reducir hasta un 70 % de las emisiones embebidas (Keena et al., 2023) pero estos hallazgos aún no se habían trasladado a la vivienda informal.

Este vacío de conocimiento justifica la investigación presentada en esta ponencia, cuyo aporte es integrar la dinámica incremental de la vivienda autoconstruida a un modelo de análisis de ciclo de vida, evaluando escenarios de gestión circular en su fase de fin de vida.

3. Metodología

La presente investigación adopta un enfoque mixto que combina trabajo de campo empírico con modelación digital y simulaciones de ciclo de vida. El diseño metodológico se estructuró en cuatro fases complementarias: (1) levantamiento de información en campo, (2) modelación representativa de vivienda informal, (3) análisis de ciclo de vida (LCA) y (4) simulación de escenarios de fin de vida bajo principios de economía circular.

3.1. Levantamiento de información en campo

El primer paso consistió en la recolección de datos primarios mediante encuestas estructuradas y entrevistas semiestructuradas a 24 hogares en tres distritos de Lima con alta presencia de asentamientos informales: Carabaylo, Ate Vitarte y Villa María del Triunfo. La selección de casos siguió un muestreo por conveniencia, priorizando viviendas en diferentes etapas de consolidación (inicio, desarrollo, culminación, consolidación) con el fin de capturar la progresión típica de la autoconstrucción limeña.

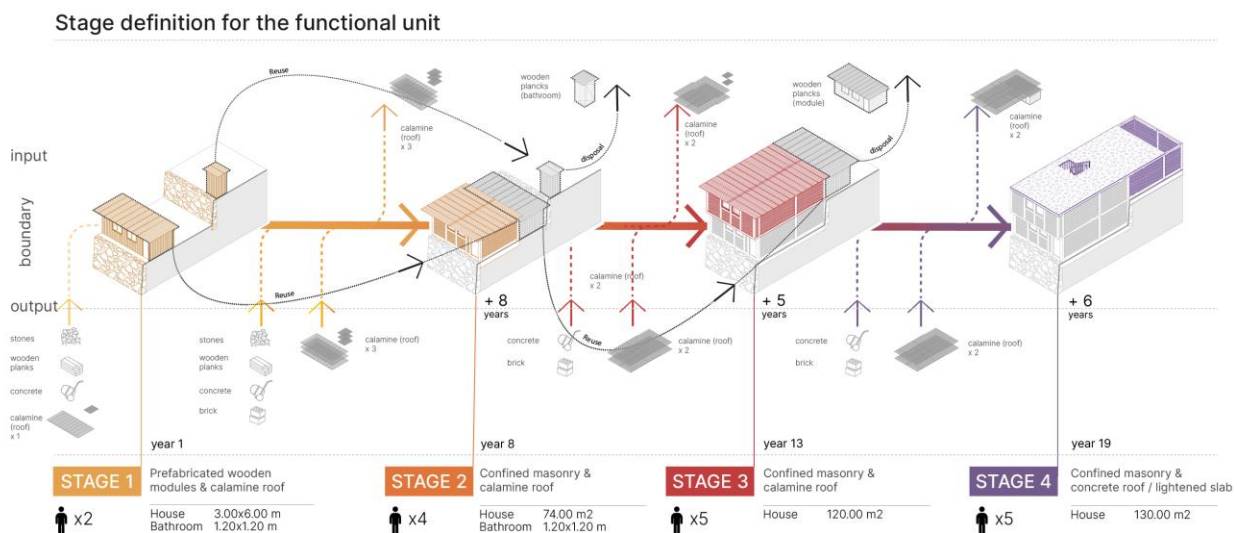
Las encuestas recogieron información sobre el historial constructivo de la vivienda, materiales empleados en cada fase, número de reemplazos realizados, densidad de ocupación y fuentes de abastecimiento de insumos. Las entrevistas a maestros de obra y comerciantes de materiales complementaron la información con perspectivas sobre prácticas de adquisición, transporte y disposición de residuos.

Este levantamiento permitió establecer un perfil de consumo de materiales representativo de cada etapa de consolidación y validar los supuestos para la modelación digital.

3.2. Modelación representativa de vivienda informal

A partir de la información en campo, se desarrolló un Modelo Representativo (MR) de vivienda informal en la plataforma Autodesk Revit bajo enfoque Building Information Modeling (BIM). El modelo incluyó parámetros de dimensiones, materiales predominantes y tipología constructiva común en Lima (figura 1).

Figura 1: Modelo representativo de vivienda informal con 4 fases de consolidación.



Fuente: elaboración propia

El uso de BIM permitió extraer automáticamente un Bill of Materials (BoM), es decir, el listado detallado de insumos empleados en cada etapa de consolidación. Este BoM constituye la base para el análisis de ciclo de vida, pues traduce las observaciones de campo en cantidades físicas de materiales. Según investigaciones previas, la integración de BIM y LCA mejora la precisión de los inventarios y permite simular reemplazos y demoliciones parciales (Llatas et al., 2021).

En este estudio, el MR incluyó tanto la estructura primaria (cimientos, muros, losas) como los elementos secundarios (puertas, ventanas, techos), reconociendo que los primeros concentran la mayor parte de la carga embebida (Eberhardt et al., 2019).

3.3. Análisis de ciclo de vida (LCA)

El análisis de ciclo de vida se realizó siguiendo la norma ISO 14040/44 (ISO, 2006), bajo el enfoque de la cuna a la tumba, es decir, incluyendo todas las etapas: extracción de materias primas, producción, transporte, construcción, uso y fin de vida.

El inventario de datos se construyó a partir de la base de datos Ecoinvent v3.8, integrada en el software GaBi. Se priorizó el uso de datasets locales o regionales de América Latina cuando estuvieron disponibles, y en su defecto se recurrió a equivalentes globales ajustados con factores de transporte para reflejar la distancia media de abastecimiento a Lima.

Los impactos ambientales evaluados fueron:

- Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), expresados en CO₂ equivalente, calculados con el método IPCC 2021.
- Consumo de agua en m³, considerando agua incorporada en procesos de producción y transporte.
- Consumo de energía fósil, expresado en MJ, siguiendo la metodología Cumulative Energy Demand (Frischknecht et al., 2015).

El alcance funcional fue una unidad habitacional que en la etapa final de consolidación tiene dos niveles y 130.0 m² construidos.

3.4. Simulación de escenarios de fin de vida

Finalmente, se modelaron tres escenarios mutuamente excluyentes para la fase de fin de vida:

- Escenario 1: Deconstrucción selectiva (S1). Consiste en el desmontaje cuidadoso de componentes, con recuperación para reuso o reciclaje de alta calidad. Se aplicaron factores de recuperación específicos por material, basados en la literatura internacional y ajustados a la realidad peruana (Gorgolewski, 2006; Zhao, 2021)
- Escenario 2: Reciclaje (S2). Implica la recolección y procesamiento de materiales en bucles cerrados (ej. reciclaje de acero) o abiertos con pérdidas de calidad (*downcycling*, ej. trituración de concreto para subbase vial). Se consideraron tasas de eficiencia y penalizaciones por calidad.

- Escenario 3: Disposición en vertedero (S3). Representa la práctica más extendida en Lima, con disposición final en botaderos o rellenos sanitarios. Este escenario se tomó como línea base, asumiendo cero recuperación de materiales y transporte promedio a 25 km.

Los beneficios ambientales de los escenarios S1 y S2 se calcularon bajo el enfoque de cargas evitadas, asignando créditos por la sustitución de materiales vírgenes que serían necesarios en ausencia de recuperación (Keena et al., 2023)

4. Resultados

4.1 Evolución de impactos por fases de consolidación

El análisis de ciclo de vida permitió cuantificar de manera diferenciada los impactos de la vivienda informal en cada fase de consolidación. En la fase inicial, caracterizada por el uso de materiales ligeros como madera, esteras y calamina, se registraron 25 tCO₂-eq, 12,500 m³ de agua y 200,000 MJ de energía fósil. Estos valores son relativamente bajos debido a la baja energía incorporada en los insumos, aunque su corta vida útil obliga a reemplazos frecuentes, lo que reduce la sostenibilidad a largo plazo. Con la fase de desarrollo, los impactos se intensificaron, alcanzando 72 tCO₂-eq, 35,000 m³ de agua y 450,000 MJ de energía fósil, debido a la incorporación de cimientos de concreto y muros de ladrillo cocido, un material reconocido por su elevada huella energética en hornos artesanales (Chen et al., 2022)

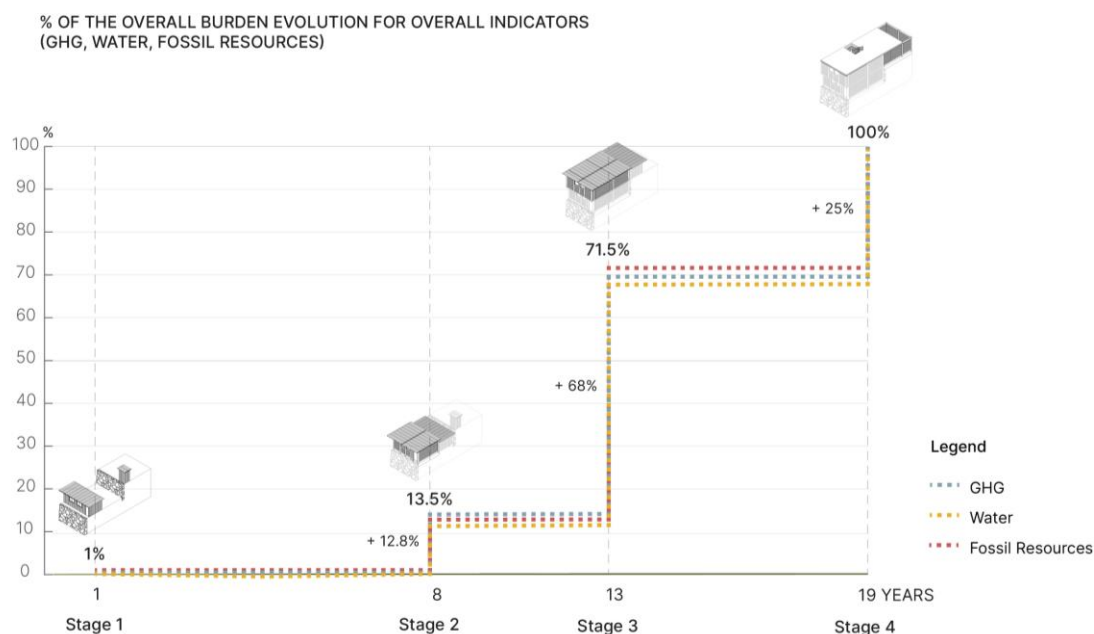
En la fase de culminación, donde predominan techos de losa de concreto armado y envolventes más duraderas, los valores ascendieron a 120 tCO₂-eq, 65,000 m³ de agua y 850,000 MJ de energía fósil. Investigaciones previas muestran que la incorporación de concreto armado puede llegar a representar más del 40 % de la carga embebida en edificios residenciales (Eberhardt et al., 2019). Esta es la fase donde se produce el salto cuantitativo más importante en cuanto a impactos medio ambientales (figura 2). Finalmente, en la fase de consolidación plena, que implica ampliaciones verticales de hasta tres niveles, los impactos alcanzaron su máximo: 183 tCO₂-eq, 104,000 m³ de agua y 1,290,000 MJ de energía fósil. Más del 80 % de las emisiones totales se concentraron en esta fase.

Tabla 1: Resultados ambientales por fases de consolidación

Fase	GEI (tCO ₂ -eq)	Agua (m ³)	Energía fósil (MJ)
Inicial	25	12,500	200,000
Desarrollo	72	35,000	450,000
Culminación	120	65,000	850,000
Consolidación	183	104,000	1,290,000

Fuente: elaboración propia.

Figura 2: Representatividad de los impactos ambientales de cada fase de la vivienda informal.



Fuente: elaboración propia

4.2 Análisis por material predominante

El desglose por materiales confirmó que el concreto fue el principal responsable de los impactos, con más del 60 % de las emisiones de GEI, resultado coherente con los informes internacionales que atribuyen al proceso de producción del clínker aproximadamente el 7 % de las emisiones globales de CO₂ (Worrell et al., 2001). El ladrillo cocido ocupó el segundo lugar, aportando alrededor de una cuarta parte de los impactos, mientras que el acero de refuerzo contribuyó con entre un 10 y 15 %. Este último, a pesar de su intensidad energética, presenta el mayor potencial de mitigación gracias a sus elevadas tasas de reciclabilidad (American Institute of Steel Construction, 2023). En contraste, la madera y la calamina tuvieron un peso menor, aunque el uso de madera no certificada plantea riesgos de deforestación en la Amazonía peruana.

4.3 Comparación de escenarios de fin de vida

La evaluación de los tres escenarios de disposición de materiales mostró contrastes significativos. El escenario de vertedero acumuló los mayores impactos, con 183 tCO₂-eq, 104,000 m³ de agua y 1,290,000 MJ de energía fósil, reflejando la práctica más extendida en Lima, donde la mayoría de los residuos de construcción termina en botaderos no regulados.

El reciclaje redujo los impactos a 55 tCO₂-eq, 33,000 m³ de agua y 425,000 MJ de energía fósil, lo que equivale a reducciones de entre el 65 % y 70 % respecto al vertedero. Este escenario resultó especialmente eficiente en el acero, que conserva sus propiedades en bucles cerrados,

mientras que el concreto reciclado presentó limitaciones por pérdida de calidad y aplicación en usos de menor valor (*downcycling*).

El escenario de deconstrucción selectiva ofreció los mejores resultados, con 35 tCO₂-eq, 19,000 m³ de agua y 260,000 MJ de energía fósil, reducciones equivalentes al 81 %, 82 % y 80 % respectivamente. Esta estrategia se beneficia de la posibilidad de recuperar y reutilizar componentes completos, como ventanas, puertas y módulos estructurales.

Tabla 2: Resultados ambientales por escenarios de fin de vida

Escenario	GEI (tCO ₂ -eq)	Agua (m ³)	Energía fósil (MJ)	Reducción % GEI	Reducción % Agua	Reducción % Energía
Vertedero	183	104,000	1,290,000	0	0	0
Reciclaje	55	33,000	425,000	70	68	67
Deconstrucción selectiva	35	19,000	260,000	81	82	80

Fuente: elaboración propia

4.4 Potencial agregado a escala urbana

Al proyectar los resultados a la escala de Lima Metropolitana, donde se construyen aproximadamente 30,000 viviendas informales por año, los impactos se multiplican de manera sustancial. Bajo el escenario de vertedero, estas viviendas representarían un incremento anual de cerca de 5 MtCO₂-eq, además de más de 3,000 millones de litros de agua y más de 38 TJ de energía fósil. En contraste, la adopción generalizada de la deconstrucción selectiva podría reducir en torno al 80 % de estos impactos, un volumen comparable a las emisiones anuales de más de un millón de automóviles (United Nations, 2021). Este ahorro de recursos reforzaría la resiliencia hídrica y energética de la ciudad, en un contexto marcado por el estrés hídrico de la cuenca del Rímac y la dependencia de combustibles fósiles importados.

5. Discusión

5.1 Tensiones entre habitabilidad y sostenibilidad

Los resultados obtenidos muestran con claridad una tensión fundamental entre la necesidad de consolidar viviendas seguras y habitables y la urgencia de reducir los impactos ambientales. En la vivienda informal limeña, el uso de materiales ligeros en las fases iniciales permite minimizar la huella ambiental, pero compromete la seguridad estructural y el confort de los ocupantes (Gilbert, 1996). Por el contrario, la incorporación de materiales “nobles” como el concreto y el ladrillo, que garantizan mayor durabilidad y resistencia, incrementa sustancialmente la huella de carbono, el consumo de agua y la demanda de energía fósil (Eberhardt et al., 2019; Williams et al., 2019). Este dilema no es exclusivo de Lima: investigaciones en otras ciudades del Sur Global

señalan que los procesos de autoconstrucción reproducen esta contradicción al priorizar la habitabilidad inmediata sobre la sostenibilidad de largo plazo (Lokko et al., 2024).

La discusión plantea, por tanto, la necesidad de políticas públicas que reconcilien estos objetivos, incentivando la introducción de prácticas constructivas más eficientes y promoviendo alternativas circulares adaptadas a la realidad socioeconómica de los barrios informales.

5.2 Potencial de la economía circular en contextos informales

El contraste entre los escenarios de vertedero, reciclaje y deconstrucción selectiva demuestra que la economía circular puede convertirse en un instrumento clave para transformar la vivienda informal. Las reducciones del 70–80 % observadas en los escenarios circulares coinciden con estimaciones internacionales sobre el potencial de mitigación del sector de la construcción, que podría reducir en más del 50 % su huella de carbono a nivel global si se adoptaran estrategias de diseño para la deconstrucción y reutilización de materiales (Keena et al., 2023; Vefago & Avellaneda, 2013)

En Lima ya existen prácticas espontáneas de reutilización, como la venta de puertas, ventanas o planchas de calamina en mercados de segunda mano, pero estas dinámicas permanecen fragmentadas e informales (Zolezzi Chocano et al., 2005). Institucionalizar estos circuitos mediante políticas de compras públicas circulares, programas de incentivo fiscal y la creación de centros de acopio podría transformar lo que hoy es una práctica marginal en una estrategia de impacto metropolitano.

5.3 Barreras institucionales y de mercado

La implementación de la economía circular en la vivienda informal enfrenta barreras significativas. Entre ellas destacan la ausencia de normativas que regulen la reutilización de materiales, la falta de infraestructura para el almacenamiento y clasificación de residuos y la debilidad de los mercados secundarios de insumos. Estas limitaciones se ven reforzadas por la informalidad de los propios barrios, donde la falta de títulos de propiedad restringe las posibilidades de acceso a financiamiento o subsidios para mejoras sostenibles (Gilbert, 1996).

En este sentido, la discusión evidencia que el desafío no es únicamente tecnológico, sino principalmente institucional y de gobernanza. Avanzar hacia la circularidad requiere construir marcos de confianza entre comunidades, municipios y sector privado, así como garantizar mecanismos de trazabilidad de materiales que reduzcan los riesgos de informalidad en los procesos de reciclaje.

5.4 Relevancia para la planificación urbana y la resiliencia

Más allá del sector vivienda, los hallazgos tienen implicaciones más amplias para la planificación urbana. La reducción del 80 % en emisiones y consumo de recursos bajo el escenario de deconstrucción selectiva refuerza el potencial de la economía circular como estrategia de mitigación climática en ciudades de rápido crecimiento. La magnitud de los beneficios se vuelve

aún más relevante en Lima, una metrópoli ubicada en una de las regiones más áridas del mundo, donde la disponibilidad de agua es limitada y la demanda energética depende en gran parte de combustibles fósiles importados.

Estos resultados sugieren que integrar la circularidad en los programas de mejoramiento barrial y en las políticas de vivienda social podría fortalecer simultáneamente la resiliencia hídrica, energética y climática de la ciudad. Experiencias internacionales en ciudades europeas muestran que los marcos regulatorios para la reutilización de materiales no solo reducen emisiones, sino que también generan empleos en sectores emergentes de la economía verde.

5.5 Necesidad de investigación multidimensional

La investigación reconoce que, si bien el análisis se centró en indicadores ambientales (GEI, agua y energía fósil), es necesario incorporar dimensiones sociales y económicas para capturar de manera integral los beneficios y limitaciones de la circularidad en contextos informales. Estudios recientes sobre metabolismo urbano han señalado que los impactos sociales, como el acceso equitativo a servicios o la generación de empleo, son tan relevantes como las métricas ambientales.

Incorporar estas dimensiones permitiría construir indicadores de sostenibilidad más robustos, alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y con las agendas globales de vivienda digna y resiliencia climática.

6. Conclusiones y recomendaciones

La investigación confirmó que la vivienda informal en Lima, al desarrollarse mediante procesos incrementales de autoconstrucción, genera una huella ambiental acumulativa significativa. Los resultados cuantitativos muestran que una vivienda consolidada alcanza 183 tCO₂-eq, 104,000 m³ de agua y 1.29 TJ de energía fósil, valores que multiplican por más de siete veces los de una vivienda en fase inicial. Este patrón responde a la sustitución de materiales ligeros por concreto, ladrillo y acero, lo que, aunque mejora la habitabilidad y la seguridad estructural, incrementa de manera exponencial la carga embebida.

Asimismo, el análisis de escenarios de fin de vida demostró que la disposición en vertedero, predominante en Lima, constituye la práctica más ineficiente en términos ambientales. En contraste, el reciclaje permitió reducciones del 65–70 % en los impactos, mientras que la deconstrucción selectiva superó el 80 %, confirmando que las estrategias circulares poseen un enorme potencial de mitigación en contextos informales.

En conclusión, la transición de un modelo lineal a uno circular en la vivienda informal limeña no solo es posible, sino necesaria. La adopción de estrategias como la deconstrucción selectiva y el reciclaje avanzado puede reducir hasta un 80 % de los impactos ambientales, contribuyendo a la mitigación del cambio climático, al ahorro de agua y energía y a la resiliencia urbana. Para lograrlo, será indispensable articular esfuerzos entre Estado, comunidades y sector privado,

construyendo un ecosistema de gobernanza que permita escalar prácticas que hoy se encuentran fragmentadas y poco institucionalizadas.

Referencias

- American Institute of Steel Construction. (2023). *Recycling | American Institute of Steel Construction*. <https://www.aisc.org/why-steel/sustainability/recycling/>
- Atmaca, A. (2016). Life cycle assessment and cost analysis of residential buildings in south east of Turkey: Part 1—review and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(6), 831–846. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1050-8>
- Benachio, G. L. F., Freitas, M. do C. D., & Tavares, S. F. (2020). Circular economy in the construction industry: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 260, 121046. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121046>
- Burga, J. (2006). *El ocaso de la barriada: Propuestas para la vivienda popular* (1. ed). Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento : Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Artes, UNI.
- Calderón Cockburn, J. (2016). *La ciudad ilegal: Lima en el siglo XX* (1a. ed.). Punto Cardinal.
- Chen, Z., Feng, Q., Yue, R., Chen, Z., Moselhi, O., Soliman, A., Hammad, A., & An, C. (2022). Construction, renovation, and demolition waste in landfill: A review of waste characteristics, environmental impacts, and mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(31), 46509–46526. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20479-5>
- Dewi, O. C., Nasruddin, Salsabila, N. D., Rahmasari, K., & Khairunnisa, G. (2025). Building circularity potential for post-disaster housing: LCA, cost evaluation, and material optimization. *Circular Economy*, 4(2), 100141. <https://doi.org/10.1016/j.cec.2025.100141>
- Driant, J.-C., & Riofrío, G. (1987). *¿Qué vivienda han construido?: Nuevos problemas en viejas barriadas*. Institut français d'études andines. <https://doi.org/10.4000/books.ifea.1792>

- Eberhardt, L. C. M., Birgisdóttir, H., & Birkved, M. (2019). Life cycle assessment of a Danish office building designed for disassembly. *Building Research & Information*, 47(6), 666–680. <https://doi.org/10.1080/09613218.2018.1517458>
- Gilbert, A. (1996). The mega-city in Latin America. In *The mega-city in Latin America* (p. xviii,282-xviii,282). <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/cid-54221>
- Gorgolewski, M. (2006). The implications of reuse and recycling for the design of steel buildings. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(4), 489–496. <https://doi.org/10.1139/I06-006>
- Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (Eds.). (2018). *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>
- Huang, L., Krigsvoll, G., Johansen, F., Liu, Y., & Zhang, X. (2018). Carbon emission of global construction sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1906–1916. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.001>
- Kamalipour, H., & Dovey, K. (2019). Mapping the visibility of informal settlements. *Habitat International*, 85, 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2019.01.002>
- Keena, N., Rondinel-Oviedo, D. R., De-los-Ríos, A. A., Sarmiento-Pastor, J., Lira-Chirif, A., Raugei, M., & Dyson, A. (2023). Implications of circular strategies on energy, water, and GHG emissions in housing of the Global North and Global South. *Cleaner Engineering and Technology*, 17, 100684. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100684>
- Lieder, M., & Rashid, A. (2016). Towards circular economy implementation: A comprehensive review in context of manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*, 115, 36–51. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.042>
- Llatas, C., Bizcocho, N., Soust-Verdaguer, B., Montes, M. V., & Quiñones, R. (2021). An LCA-based model for assessing prevention versus non-prevention of construction waste in buildings. *Waste Management*, 126, 608–622. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.03.047>

- Lokko, M., Manu, F. W., Mboup, N., Etman, M. A., Raugei, M., Niang, I., Ametepe, K., & Sarfo-Mensah, R. (2024). Comparing the whole life cycle carbon impact of conventional and biogenic building materials across major residential typologies in Ghana and Senegal. *Sustainable Cities and Society*, 106, 105332. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105332>
- Nordby, A. S., Berge, B., Hakonsen, F., & Hestnes, A. G. (2009). Criteria for salvageability: The reuse of bricks. *Building Research & Information*, 37(1), 55–67. <https://doi.org/10.1080/09613210802476023>
- Pacheco-Torgal, F., & Ding, Y. (Eds.). (2013). *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste* (1st ed.). Woodhead Publishing. <https://www.elsevier.com/books/handbook-of-recycled-concrete-and-demolition-waste/pacheco-torgal/978-0-85709-682-1>
- Pena-Guillen, V., & Murakami, A. (2017). Dynamics of house state consolidation in Lima Metropolitan area: A cellular automata approach. *Journal of the Japanese Institute of Landscape Architecture*, 80(5), 657–662. <https://doi.org/10.5632/jila.80.657>
- Purchase, C. K., Al Zulayq, D. M., O'Brien, B. T., Kowalewski, M. J., Berenjian, A., Tarighaleslami, A. H., & Seifan, M. (2021). Circular Economy of Construction and Demolition Waste: A Literature Review on Lessons, Challenges, and Benefits. *Materials*, 15(1), 76. <https://doi.org/10.3390/ma15010076>
- Ricou, X. (1988). Huaycán, una experiencia de rehabilitación urbana. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 17(1), 65–85.
- Tamura, J., Miyazaki, S., & Honma, K. (2014). Research on housing and urban improvement for low income population. *Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ)*, 79(696), 475–482. <https://doi.org/10.3130/aija.79.475>
- Turner, J. C. (1968). Housing Priorities, Settlement Patterns, and Urban Development in Modernizing Countries. *Journal of the American Institute of Planners*, 34(6), 354–363. <https://doi.org/10.1080/01944366808977562>

UN-Habitat. (2020). *The New Urban Agenda Illustrated*.

<https://unhabitat.org/sites/default/files/2019/05/nua-english.pdf>

United Nations. (2021). *The Sustainable Development Goals Report 2021*. Department of

Economic and Social Affairs. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2021/extended-report/>

Vefago, L. H. M., & Avellaneda, J. (2013). Recycling concepts and the index of recyclability for building materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 72, 127–135.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.12.015>

Williams, D. S., Máñez Costa, M., Sutherland, C., Celliers, L., & Scheffran, J. (2019).

Vulnerability of informal settlements in the context of rapid urbanization and climate change. *Environment and Urbanization*, 31(1), 157–176.

<https://doi.org/10.1177/0956247818819694>

Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. O. (2001). CARBON DIOXIDE

EMISSIONS FROM THE GLOBAL CEMENT INDUSTRY¹. *Annual Review of Environment and Resources*, 26(Volume 26, 2001), 303–329.

<https://doi.org/10.1146/annurev.energy.26.1.303>

Yeheyis, M., Hewage, K., Alam, M. S., Eskicioglu, C., & Sadiq, R. (2013). An overview of

construction and demolition waste management in Canada: A lifecycle analysis approach to sustainability. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 15(1), 81–91.

<https://doi.org/10.1007/s10098-012-0481-6>

Zhao, L. (2021). Exploring the spatial planning dimensions of urban informal food systems in

Nanjing, China. *Urban Agriculture & Regional Food Systems*, 6(1), e20012.

<https://doi.org/10.1002/uar2.20012>

Zolezzi Chocano, M., Tokeshi, J., Noriega Jugo, C., & Programa Urbano (Desco) (Eds.). (2005).

Densificación habitacional: Una propuesta de crecimiento para la ciudad popular.

Programa Urbano, Centro de Estudios y Promoción del Desarrollo.

Biografías de los autores conferencistas

Jaime Miguel Sarmiento Pastor. (Lima, 1979)

Arquitecto con más de 20 años de experiencia, formado en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (Perú) y con un Máster en Ciencias en Diseño Territorial y Urbano por la Universidad Tecnológica de Delft (Países Bajos). Su experiencia en arquitectura y diseño urbano abarca desde la práctica privada, la docencia y la redacción de artículos para publicación. Finalista en varios concursos de diseño, tanto en el sector privado como en el público. Muy entusiasta respecto a los procesos urbanos relacionados con la movilidad, la competitividad de las ciudades, la cultura y el diseño contemporáneo del paisaje. Miembro del grupo de investigación de la Universidad de Lima “Ciudad, Paisaje y Patrimonio”.

Andrés Martín Lira Chirif. (Lima, 1976)

Arquitecto con más de 20 años de experiencia en el diseño y supervisión de proyectos residenciales, comerciales y de oficinas. Docente universitario con sólida trayectoria en la enseñanza de Talleres de Proyectos Arquitectónicos, cursos de Construcción, Gestión de Proyectos y Seminarios de Investigación. Investigador activo en sostenibilidad urbana, estrategias circulares de construcción y regeneración en contextos informales. Miembro del Grupo de Investigación Ciudad, Paisaje y Patrimonio de la Cátedra UNESCO de la Universidad de Lima. Colabora en proyectos internacionales con universidades como Yale, Oxford y McGill, y ha publicado en revistas científicas indexadas Q1.