

INNOVACIÓN EN INGENIERÍA CIVIL:

APLICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS EMERGENTES Y LA ECONOMÍA CIRCULAR EN LA CONSTRUCCIÓN

**SAMUEL CCALLO CCAHUANA
EDWAR GARCIA AREVALO
LEONARDO SARAVIA PARRA
ROCKY GIBAN AYALA BIZARRO**



INNOVACIÓN EN INGENIERÍA CIVIL:

APLICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS EMERGENTES Y LA ECONOMÍA CIRCULAR EN LA CONSTRUCCIÓN

**SAMUEL CCALLO CCAHUANA
EDWAR GARCIA AREVALO
LEONARDO SARAVIA PARRA
ROCKY GIBAN AYALA BIZARRO**



Conselho Editorial

Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva - UNIDAVI
Prof. Dr. Astor João Schönell Júnior - IFFAR
Prof. Dr. Alan Ricardo Costa - UFRR
Prof. Dr. Allan Diêgo Rodrigues Figueiredo - UESPI
Profa. Dra. Andréia Bulaty - UNESPAR
Profa. Dra. Carla da Conceição de Lima - UFVJM
Prof. Dr. Camilo Darsie de Souza - UNISC
Profa. Dra. Clarice Caldeira Leite - UFRGS
Profa. Dra. Cecilia Decarli - UFRGS
Prof. Dr. Carlos Adriano Martins - UNICID
Prof. Dr. Christian Dennys Monteiro de Oliveira - UFCE
Profa. Dra. Dayse Marinho Martins - UFMA
Prof. Dr. Deivid Alex dos Santos - UEL
Prof. Dr. Dioni Paulo Pastorio - UFRGS
Prof. Dr. Douglas Manoel Antonio de Abreu Pestana dos Santos - FASESP
Profa. Dra. Elane da Silva Barbosa - UERN
Profa. Dra. Elen Gomes Pereira - IFBA
Profa. Dra. Francielle Benini Agne Tybusch - UFN
Prof. Dr. Francisco Odécio Sales - IFCE
Prof. Dr. Francisco Ricardo Miranda Pinto - UFCAT
Prof. Dr. Gilvan Charles Cerqueira de Araújo - UCB
Prof. Dr. Ismar Inácio dos Santos Filho - UFAL
Prof. Dr. Leonardo Bigolin Jantsch - UFSM
Profa. Dra. Liziany Müller Medeiros - UFSM
Profa. Dra. Marcela Mary José da Silva - UFRB
Prof. Dr. Mateus Henrique Köhler - UFSM
Prof. Dr. Michel Canuto de Sena - UFMS
Profa. Dra. Mônica Aparecida Bortolotti - UNICENTRO
Prof. Nilton David Vilchez Galarza - UPLA
Prof. Dr. Olavo Barreto de Souza - UEPB
Prof. Dr. Rafael Nogueira Furtado - UFABC
Prof. Dr. Roberto Araújo da Silva Vasques Rabelo - UNISANTOS
Prof. Dr. Rodrigo Toledo - USCS
Prof. Dr. Rodolfo Rodrigues de Souza - UERJ
Prof. Dr. Sidnei Renato Silveira - UFSM
Prof. Dr. Thiago Ribeiro Rafagnin - UFOB
Prof. Dr. Tomás Raúl Gómez Hernández - UCLV

Editor Chefe: Ivania Folmer

Bibliotecária: Maria Alice Ferreira

Projeto gráfico e Diagramação: Gabriel Eldereti Machado

Imagem capa: www.canva.com

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Innovación en ingeniería civil [livro eletrônico] :
aplicación de las tecnologías emergentes y la
economía circular en la construcción / Samuel
Ccallo Ccahuana ... [et al.]. -- 1. ed. --
Santa Maria, RS : Arco Editores, 2025.
PDF

Outros autores: Edwar Garcia Arevalo, Leonardo
Saravia Parra, Rocky Giban Ayala Bizarro

Bibliografia

ISBN 978-65-5417-516-6

1. Construção civil 2. Engenharia civil
3. Engenharia civil (Estruturas) 4. Inovação
I. Ccahuana, Samuel Ccallo. II. Arevalo, Edwar
Garcia. III. Parra, Leonardo Saravia. IV. Bizarro,
Rocky Giban Ayala.

25-292281.0

CDD-624.15

Índices para catálogo sistemático:

1. Engenharia civil 624.15

Maria Alice Ferreira - Bibliotecária - CRB-8/7964



10.48209/978-65-5417-516-6

Este livro é o resultado de uma pesquisa científica em atividades de ciência e tecnologia.

O trabalho foi revisado por pares acadêmicos externo antes de ser publicado.



CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
RESUMEN.....	9
ABSTRACT.....	10
INTRODUCCIÓN.....	11
CAPÍTULO I.....	13
TECNOLOGÍAS EMERGENTES.....	13
1.1. Tecnologías emergentes: aspectos fundamentales.....	14
1.2. Tipos de tecnologías emergentes.....	16
1.3. Innovación desde las tecnologías emergentes y su relación con la ingeniería civil.....	19
1.4. Ventajas y desventajas del uso de tecnologías emergentes en la ingeniería civil.....	24
1.5. Ingeniería civil: desafíos de la aplicación de las tecnologías emergentes en la actualidad.....	28
CAPÍTULO II.....	33
ECONOMÍA CIRCULAR.....	33
2.1. ¿Qué es la economía circular?.....	34
2.2. Principios de la economía circular.....	36
2.3. Beneficios de la economía circular.....	39
2.4. La economía circular como estrategia para el desarrollo sostenible.....	42
2.5. Barreras para implementar la economía circular.....	44
2.6. La economía circular en el campo de la construcción.....	47
CAPÍTULO III.....	50
TECNOLOGÍAS EMERGENTES Y ECONOMÍA CIRCULAR EN INGENIERÍA CIVIL.....	50
3.1. La tecnología en ingeniería civil.....	51

3.2. Avances de la tecnología en la construcción: panorama general.....	53
3.3. Aplicación de las tecnologías emergentes en ingeniería civil.....	56
3.3.1. Influencia de la inteligencia artificial en ingeniería civil.....	58
3.3.2. Big data y su importancia en las construcciones.....	59
3.4. Economía circular: uso de los residuos de construcción.....	61
3.4.1. Gestión y tratamiento de residuos de construcción.....	64
CAPÍTULO IV.....	66
TECNOLOGÍAS EMERGENTES EN INGENIERÍA CIVIL Y LA ECONOMÍA CIRCULAR: UNA REVISIÓN DE ALCANCE.....	66
4.1. Metodología.....	68
4.2. Resultados y discusión.....	71
4.3. Conclusiones.....	84
CAPÍTULO V.....	86
AVANCES ACTUALES EN LA INGENIERÍA CIVIL.....	86
5.1. Ingeniería verde para la sostenibilidad ambiental.....	87
5.2. Las tecnologías emergentes en la industria constructora.....	89
5.3. Economía circular e innovación en la construcción.....	92
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
SOBRE LOS AUTORES.....	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Consideraciones en torno a la tecnología emergente.....	15
Tabla 2 Tecnologías emergentes en auge.....	17
Tabla 3 Aspectos metodológicos y contextuales en la innovación de tecnologías emergentes y convergentes.....	21
Tabla 4 Definiciones de economía circular.....	35
Tabla 5 Economía circular y manejo de la sostenibilidad.....	44
Tabla 6 Áreas de aplicación de la IA.....	58
Tabla 7 Áreas de aplicación del big data.....	60
Tabla 8 Criterios de inclusión y exclusión.....	68
Tabla 9 Hallazgos principales detectados en la revisión sistemática.....	71
Tabla 10 Resumen de tecnologías emergentes.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Propiedades de toda economía circular.....	35
Figura 2 Economía circular: principios elementales.....	37
Figura 3 Ventajas de la economía circular.....	39
Figura 4 Principales aspectos y desafíos de la economía circular en la gestión de residuos de construcción.....	62
Figura 5 Diagrama de flujo metodológico, según el protocolo PRISMA.....	70
Figura 6 Composición gráfica de los aspectos cuantitativos del estudio.....	81

RESUMEN

El avance de la transformación industrial en el siglo XXI ha posibilitado el desarrollo de diversas tecnologías emergentes vinculadas con la economía circular en el sector de la construcción. El objetivo de este estudio fue integrar los aspectos conceptuales y aplicados de las tecnologías emergentes y la economía circular en el ámbito de la ingeniería civil. Para ello, se realizó una revisión integradora de la literatura en las bases de datos Scopus, SciELO y Google Scholar. Se identificaron 1201 documentos, distribuidos de la siguiente manera: 368 en Scopus, 383 en SciELO y 450 en Google Scholar. Tras aplicar los criterios de elegibilidad, se seleccionaron 15 artículos para su análisis en profundidad. Los resultados muestran que el 33.33 % ($n = 5$) aborda exclusivamente la economía circular, el 26.67 % ($n = 4$) se centra en las tecnologías emergentes en la ingeniería civil, y el 40 % ($n = 6$) trata la integración de ambas temáticas en este campo. Asimismo, se identificaron diversas barreras potenciales que pueden afectar la implementación de estas tecnologías, como el uso de celulosa vegetal, tecnologías digitales, inteligencia artificial y drones. Se concluye que es necesario profundizar en investigaciones sobre barreras de seguridad, circularidad en la etapa de diseño y calidad de las tecnologías aplicadas a materiales reutilizables, reciclables y recuperables.

Palabras clave: tecnologías emergentes, economía circular, ingeniería civil, sector construcción, celulosa vegetal, tecnología digital.

ABSTRACT

The advancement of industrial transformation in the 21st century has enabled the development of various emerging technologies linked to the circular economy in the construction sector. The objective of this study was to integrate the conceptual and applied aspects of emerging technologies and the circular economy in the field of civil engineering. To this end, an integrative review of the literature was conducted in the Scopus, SciELO, and Google Scholar databases. A total of 1,201 documents were identified, distributed as follows: 368 in Scopus, 383 in SciELO, and 450 in Google Scholar. After applying the eligibility criteria, 15 articles were selected for in-depth analysis. The results show that 33.33% ($n = 5$) deal exclusively with the circular economy, 26.67% ($n = 4$) focus on emerging technologies in civil engineering, and 40% ($n = 6$) deal with the integration of both topics in this field. Several potential barriers that may affect the implementation of these technologies were also identified, such as the use of plant cellulose, digital technologies, artificial intelligence, and drones. It is concluded that further research is needed on safety barriers, circularity in the design stage, and the quality of technologies applied to reusable, recyclable, and recoverable materials.

Keywords: Emerging technologies, circular economy, civil engineering, construction sector, vegetal cellulose, digital technology.

INTRODUCCIÓN

En el presente siglo, la ingeniería civil se encuentra inmersa en una etapa de transformación profunda en la que convergen dos fuerzas que están redefiniendo la forma en que se conciben, diseñan y gestionan las infraestructuras: las tecnologías emergentes y la economía circular. En un contexto de aceleración tecnológica, creciente escasez de recursos naturales y efectos del cambio climático, es urgente repensar los modelos constructivos tradicionales. Por ello, el presente libro se erige como una visión integradora que responde a este contexto al explorar cómo la innovación tecnológica y los principios de sostenibilidad se convierten en una sólida base para una nueva ingeniería civil más eficiente, resiliente y comprometida con el entorno.

Esta publicación se estructura en cinco capítulos que abordan aspectos conceptuales, investigativos y aplicados. El capítulo I expone las bases teóricas de las tecnologías emergentes, describe sus características disruptivas y examina su impacto en sectores estratégicos como la ingeniería civil. Incluye el análisis de herramientas como la inteligencia artificial, el modelado digital, la impresión 3D y los drones, junto con una evaluación de sus beneficios y los retos que plantea su adopción. También se consideran las implicaciones éticas, sociales y formativas asociadas a su implementación, así como las competencias profesionales requeridas para su adecuada integración en el ámbito constructivo.

En el capítulo II se presenta el modelo de economía circular como una alternativa al esquema lineal de producción y consumo. Se explican sus principios fundamentales —reutilización, reparación y reciclaje— y se examinan sus ventajas económicas, sociales y ambientales. Además, se analizan las barreras que dificultan su implementación, especialmente en contextos culturales, organizativos y regulatorios. El capítulo concluye con la exposición de experiencias de aplicación en el sector construcción, resaltando su capacidad para reducir residuos, optimizar recursos y fomentar prácticas sostenibles.

En el capítulo III se integran ambas dimensiones —tecnologías emergentes y economía circular— en el contexto de la ingeniería civil. El contenido incluye avances tecnológicos en el sector construcción y plantea soluciones orientadas a la gestión circular de los residuos para minimizar los impactos y recuperar materiales.

El capítulo IV recoge los hallazgos de una revisión integradora de la literatura científica. A partir del análisis de más de 1200 documentos, se seleccionaron 15 estudios con aportes relevantes para el campo de la ingeniería civil. Estos trabajos evidencian avances pero también limitaciones técnicas y estructurales en la incorporación de tecnologías emergentes y principios de economía circular. Se reconoce la necesidad de profundizar en temas como la seguridad, la circularidad desde la etapa de diseño y la calidad de los materiales reutilizables, reciclables y recuperables.

Finalmente, el capítulo V ofrece una síntesis de los avances más representativos en la ingeniería civil contemporánea. Así, destaca el papel de la ingeniería verde y de tecnologías como los materiales autorreparables y los sistemas inteligentes de monitoreo. Por su parte, la innovación aparece como eje transformador y requiere nuevas estructuras organizativas y educativas para consolidar su impacto.

En conjunto, este libro de investigación ofrece una mirada al presente y al futuro de la ingeniería civil, haciendo énfasis en la integración de herramientas tecnológicas y en la necesidad de transformar los enfoques tradicionales. A su vez, propone una ingeniería civil orientada no solo a la resolución de problemas técnicos, sino también al compromiso con la sostenibilidad ambiental y el bienestar social.

CAPÍTULO I

TECNOLOGÍAS EMERGENTES

El avance acelerado de la tecnología ha producido un impacto profundo en los sectores productivo, educativo y social. Este contexto ha dado lugar al surgimiento de las llamadas “tecnologías emergentes”, las cuales han comenzado a redefinir procesos, modelos de negocio y estructuras institucionales en diversas disciplinas. Aunque muchas de estas tecnologías aún se encuentran en fases iniciales de desarrollo, su alto potencial transformador ya resulta evidente en campos como la ingeniería civil. Su incorporación permite replantear la manera en que se conciben, diseñan y construyen infraestructuras, con el objetivo de alcanzar mayor eficiencia, sostenibilidad y resiliencia. Este capítulo inicial presenta el concepto y la clasificación de las tecnologías emergentes, así como su impacto y los principales desafíos en el ámbito de una ingeniería civil contemporánea.

A partir de lo mencionado, se ofrece un estudio detallado de los aspectos clave que definen las tecnologías emergentes. Se analiza su carácter transversal, disruptivo y complejo, así como su alto potencial transformador en distintos campos. También se discuten las dificultades que presenta su estudio debido a su naturaleza multidisciplinaria y a la rapidez con la que evolucionan, lo cual plantea un reto constante para su comprensión e integración.

Asimismo, a lo largo del capítulo se examina la tipología de estas tecnologías, que son diferenciadas como básicas, de vanguardia y específicas aplicadas. Esta clasificación permite comprender su nivel de desarrollo, el grado de adopción que han alcanzado y su aplicabilidad en contextos estratégicos, como la ingeniería civil. Esta distinción facilita una visión más clara sobre sus usos potenciales y sus implicancias técnicas y organizativas.

El texto también establece una relación directa entre innovación y tecnologías emergentes, con especial énfasis en su impacto en el ámbito constructivo. Al respecto, se abordan casos concretos de herramientas como el modelado

de información de construcción (BIM), la inteligencia artificial, la impresión 3D, los drones y la nanotecnología. Actualmente, estas tecnologías están transformando los métodos constructivos y los procesos de gestión de proyectos, lo cual impulsa nuevas formas de diseñar, planificar y ejecutar infraestructuras.

Finalmente, se presentan las principales ventajas y desventajas asociadas al uso de estas tecnologías. Entre los beneficios destacan la optimización de recursos, el aumento de la productividad y la mejora en la seguridad de las obras. No obstante, también se identifican barreras económicas, culturales y organizativas que dificultan su adopción. El capítulo culmina con una reflexión sobre los desafíos actuales para su integración en la ingeniería civil, subrayando la importancia de una formación continua, el abordaje ético de estas herramientas y la necesidad de actuar desde una perspectiva transdisciplinaria y humanista.

1.1. Tecnologías emergentes: aspectos fundamentales

Las tecnologías emergentes (TE) son aquellas que se encuentran en las primeras etapas de su desarrollo y que surgen a partir de propuestas innovadoras que tienen el potencial de transformar significativamente procesos, habilidades o aplicaciones ya establecidas. Para Venegas-Loor y Moreira-Aguayo (2021), estas tecnologías cuestionan los conceptos tradicionales del mercado, e incluso pueden llegar a modificar industrias consolidadas y reemplazar técnicas ampliamente utilizadas.

Por ejemplo, en el terreno de la educación, las TE son recursos tecnológicos innovadores como la realidad virtual (RV), la realidad aumentada (RA), la realidad mixta (RM), lectores inmersivos, inteligencia artificial (IA), entre otros, que están siendo incorporados en la práctica educativa en distintos niveles. Se trata de tecnologías que buscan potenciar entornos inclusivos, facilitando el acceso y motivación de los alumnos, especialmente de aquellos con necesidades educativas especiales, y ofrecen nuevas posibilidades didácticas. Sin embargo, su adopción aún requiere formación y actualización del profesorado para aprovechar sus ventajas de manera efectiva (Núñez y Santamaría, 2024).

Por otro lado, el concepto de TE se caracteriza por su capacidad de generar cambios profundos en distintos ámbitos, gracias a la incorporación de avances en áreas como las tecnologías digitales, la información y la comunicación, la robótica, los nuevos materiales y el internet de las cosas, lo que permite el acceso, producción, tratamiento y transmisión de información en múltiples formatos, como texto, imagen y sonido; esto amplía sus aplicaciones y su impacto en sectores como la educación, el trabajo y la interacción social (Venegas-Loor y Moreira-Aguayo, 2021).

Amaro y Robles (2020) explican ciertos pilares y conceptos básicos sobre las TE, como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. *Consideraciones en torno a la tecnología emergente*

Particularidades y dinámicas	Las TE exponen características particulares que las diferencian de los sectores tradicionales, incluyendo aspectos relacionados con los actores involucrados, derechos de propiedad y dinámicas sociales, tecnológicas y económicas, además de ser transversales a múltiples sectores productivos. Esto impacta en diversos procesos, productos y servicios.
Posicionamiento y paradigmas	Muchas TE representan un nuevo paradigma socioeconómico, con potenciales transformadores y a veces disruptivos del sistema productivo.
Impulso y potencial transformador	Las TE potencian avances en la productividad y eficiencia, y pueden crear nuevos sectores económicos. Es que la innovación en estas tecnologías a menudo provoca cambios en las estructuras de producción, regulación y en los papeles de actores diversos (empresa, academia, Estado, sociedad civil).
Dificultades en su estudio y medición	La naturaleza multidisciplinaria y transdisciplinaria requiere enfoques metodológicos innovadores y adaptativos para su análisis y evaluación. De igual forma, existe dificultad en acceder y categorizar información, ya que estas tecnologías afectan diversos sectores y procesos.
Impacto social, ético y medioambiental	La rápida innovación plantea cuestiones éticas, sociales y medioambientales que deben ser consideradas en las políticas y regulaciones que acompañan su desarrollo.
Necesidad de enfoques complementarios	Es recomendable complementar los indicadores tradicionales con esquemas metodológicos específicos para comprender la dinámica de estas tecnologías y su impacto en innovación y desarrollo.

Nota. Adaptado de Amaro y Robles (2020)

Las TE representan desarrollo e innovación en diversos sectores, tales son los casos de avances como la IA, la realidad virtual, el internet de las cosas o el *blockchain*, los cuales han transformado la manera en que las organizaciones operan; de esta manera, les permiten ser más eficientes, competitivas e innovadoras en la creación de productos y servicios. A su vez, estas tecnologías impulsan el crecimiento económico y ofrecen nuevas soluciones a problemas globales complejos (Escuela de Educación Superior Tecnológica, 2023).

El impacto positivo se extiende a la vida cotidiana de las personas y otras ramas del conocimiento, desde mejorar la calidad de la atención médica con diagnósticos más precisos hasta facilitar el acceso a la educación mediante plataformas digitales y entornos de aprendizaje inmersivos. Y es que las TE se caracterizan por ayudar a reducir brechas sociales y geográficas.

1.2. Tipos de tecnologías emergentes

La literatura científica contemporánea ha propuesto una clasificación clave para comprender las tendencias tecnológicas emergentes y su impacto en distintos ámbitos sociales y gubernamentales. Basándose en metodologías rigurosas como el enfoque Prisma, los estudios recientes de Valle-Cruz y Gil-García (2022) identifican tres grandes categorías de tecnologías según su nivel de desarrollo, grado de adopción y potencial transformador: tecnologías básicas, que sustentan la infraestructura digital actual; tecnologías de vanguardia, que representan el límite de la innovación contemporánea; y tecnologías específicas aplicadas, dirigidas a sectores estratégicos. Esta estructura permite analizar de manera más clara el ecosistema tecnológico en constante cambio y su proyección hacia el futuro.

Para Valle-Cruz y Gil-García (2022), la utilidad de esta clasificación radica en organizar el panorama tecnológico y revelar el dinamismo entre las categorías, ya que muchas tecnologías, inicialmente concebidas para aplicaciones concretas, pueden evolucionar hacia un uso más generalizado a medida que maduran y se integran en diversos contextos.

Tabla 2. Tecnologías emergentes en auge

Tecnologías emergentes básicas	Las TE básicas constituyen los fundamentos de la infraestructura digital contemporánea porque, aunque pueden considerarse establecidas en ciertos contextos, siguen evolucionando y presentando características emergentes en su implementación, particularmente en entornos de gobierno y Administración pública. La investigación científica identifica como tecnologías básicas a la tecnología móvil, que continúa evolucionando hacia sistemas más integrados y ubicuos; la Web 2.0, que ha transformado la interacción entre ciudadanos e instituciones; las páginas web dinámicas con integración de servicios avanzados y las tecnologías de información y comunicación (TIC) en su sentido más amplio.
Tecnologías emergentes de vanguardia	Las tecnologías de vanguardia representan la frontera actual de la innovación tecnológica, con aplicaciones que están comenzando a transformar radicalmente diversos sectores. Estas tecnologías se caracterizan por su alto potencial disruptivo y por encontrarse en fases iniciales o intermedias de adopción generalizada. La investigación científica identifica cuatro tecnologías principales en esta categoría: • <i>Blockchain</i>, que está revolucionando la gestión de datos y transacciones mediante sistemas descentralizados. • Inteligencia artificial, una tecnología transversal con un alto potencial de impacto en todos los niveles, que se ha posicionado como uno de los principales motores de cambio hacia el 2025 con capacidades cada vez más avanzadas para el procesamiento y generación de información. • Macrodatos o <i>big data</i>, gran aporte que permite el análisis de volúmenes sin precedentes de información. • Internet de las cosas (IoT), que interconecta dispositivos físicos para crear ecosistemas inteligentes. Estos avances están transformando fundamentalmente la forma en que se procesan datos, se toman decisiones y se implementan soluciones en entornos complejos.
Tecnologías específicas y aplicadas	Las tecnologías específicas y aplicadas representan implementaciones concretas de soluciones tecnológicas emergentes en sectores estratégicos. Una de sus características es que las aplicaciones suelen combinar elementos de las categorías anteriores para resolver problemas particulares en contextos definidos. La investigación científica ha identificado implementaciones significativas en cuatro áreas principales: ciudades inteligentes, que integran múltiples tecnologías para mejorar la gestión urbana y la calidad de vida; agricultura urbana tecnificada, que aplica soluciones digitales a la producción de alimentos en entornos urbanos; sistemas de conciencia ambiental, que monitorizan y gestionan parámetros ambientales; y telesalud, que permite la prestación de servicios sanitarios a distancia. Ahora bien, estas implementaciones específicas demuestran cómo las TE pueden adaptarse a contextos particulares para resolver problemas concretos. Los estudios también indican que el éxito de estas aplicaciones depende tanto de la madurez tecnológica como de factores contextuales, incluyendo la capacitación de los usuarios, el marco regulatorio y la aceptación social.

Nota. Adaptado de Valle-Cruz y Gil-García (2022)

El portal del Estado peruano, Gob.pe (2025), menciona que *The Stanford Emerging Technology Review 2025* proporciona una visión integral de las principales TE con mayor potencial transformador, que abarca diez campos tecnológicos clave: inteligencia artificial (IA), biotecnología y biología sintética, criptografía, láseres, ciencia de los materiales, neurociencia, robótica, semiconductores, exploración espacial y energía sostenible; cada uno de estos campos presenta características únicas y potencial disruptivo en diversos sectores.

Ahora bien, la convergencia entre estas tecnologías genera sinergias que amplifican su impacto, por ejemplo, los avances en IA han acelerado descubrimientos en otros campos científicos, mientras que las mejoras en semiconductores han ayudado a potenciar las capacidades computacionales necesarias para el desarrollo de una IA más sofisticada. Es importante tener en cuenta lo que sostiene el Foro Económico Mundial (2024) respecto de esta clase de TE:

- **IA para el descubrimiento científico.** Una de las tendencias más significativas identificadas en la literatura científica reciente es el uso de la IA como herramienta para acelerar el descubrimiento científico. Esta herramienta está transformando fundamentalmente el proceso de investigación en múltiples disciplinas.

Los sistemas de IA han demostrado capacidades sin precedentes para predecir estructuras proteicas tridimensionales que están revolucionando la investigación biomédica, por ejemplo, la IA ha sido aplicada con éxito en el descubrimiento de nuevos antibióticos y en el desarrollo de materiales avanzados para baterías, acelerando así procesos que tradicionalmente requerían años de investigación.

El Consejo de Asesores sobre Ciencia y Tecnología (2024) de Estados Unidos ha reconocido que la IA tiene el potencial de transformar todas las disciplinas científicas y muchos aspectos de nuestra forma de hacer ciencia, transformación que incrementa la velocidad del descubrimiento científico y permite explorar espacios de solución previamente inaccesibles debido a su complejidad o dimensionalidad.

- **Tecnologías de conectividad avanzada.** Las investigaciones recientes han identificado avances significativos en tecnologías de conectividad

que están transformando las comunicaciones y el acceso a datos. Estas tecnologías buscan equilibrar la creciente demanda de conexiones de alta velocidad con la necesidad de soluciones energéticamente eficientes.

Por ejemplo, las superficies inteligentes reconfigurables (RIS) representan una innovación fundamental en este campo porque optimizan las comunicaciones inalámbricas mediante el control dinámico de ondas electromagnéticas, combinando metamateriales, algoritmos inteligentes y procesamiento avanzado de señales, además de que su capacidad para convertir superficies ordinarias en componentes activos de redes inalámbricas promete mejorar significativamente la cobertura y eficiencia en diversos entornos.

Complementariamente, los sistemas de estaciones en plataformas a gran altitud (HAPS) ofrecen nuevas soluciones para la conectividad global, operando a aproximadamente 20 km de altura sobre la Tierra, ya que estas plataformas aprovechan tecnologías solares, de baterías y de materiales compuestos ligeros para proporcionar capacidades de comunicación superiores a las torres terrestres y satélites, especialmente en regiones remotas.

El panorama de las TE muestra un ecosistema dinámico y en constante evolución, en el que la clasificación en tecnologías básicas, de vanguardia y específicas aplicadas permite comprender mejor su desarrollo, adopción e impacto potencial. Desde las infraestructuras digitales fundamentales hasta las soluciones sectoriales más avanzadas, estas tecnologías están reconfigurando múltiples dimensiones de la sociedad, la ciencia y la gestión pública.

1.3. Innovación desde las tecnologías emergentes y su relación con la ingeniería civil

Las TE se han convertido en pilares fundamentales en los procesos de innovación contemporáneos, debido a su naturaleza disruptiva y transformadora. Estas tecnologías se caracterizan principalmente por ser disruptivas, recientes o encontrarse en etapas tempranas de desarrollo, pero con un gran potencial de innovación y transformación en diversos ámbitos. Como afirman Medina-Cárdenas y Rico-Bautista (2025), su capacidad para alterar mercados establecidos

y crear nuevas oportunidades representa un factor diferencial en comparación con tecnologías convencionales.

El impacto de estas tecnologías trasciende sectores específicos para convertirse en fuerzas transformadoras con aplicaciones transversales. Una de las características distintivas de las TE no reside únicamente en su novedad, sino en su capacidad para reconfigurar procesos existentes y crear nuevos paradigmas que impulsan la innovación. Ynzunza *et al.* (2017) sostienen que estos sistemas tecnológicos avanzan rápidamente y convergen entre sí, creando sinergias que potencian sus efectos disruptivos y multiplican su impacto en distintos ecosistemas de innovación.

Por otro lado, la digitalización de sistemas de información y producción constituye uno de los aspectos más relevantes de esta transformación tecnológica, ya que la integración de sistemas automatizados para la adquisición de datos de máquinas y líneas de producción, junto con el intercambio de información para el monitoreo y control de procesos, ha permitido la toma de decisiones en tiempo real, lo que representa un cambio paradigmático en la gestión empresarial. Esta capacidad para representar digitalmente cada aspecto de la manufactura, desde el diseño hasta el proceso de fabricación, caracteriza a las industrias más avanzadas del período analizado (Ynzunza *et al.*, 2017).

Además del carácter disruptivo y transformador de las TE, estas han tenido un impacto significativo en sectores como el turismo, la construcción y la educación, en los que han posibilitado la optimización de procesos, la mejora en la experiencia del cliente y la implementación de nuevos modelos de negocio. Para poner un ejemplo representativo, en el turismo, la adopción de IA, la realidad aumentada y la automatización ha revolucionado la planificación y experiencia de viajes, favoreciendo la competitividad de las pymes del sector. Por otro lado, en el sector construcción, tecnologías como el modelado de información de construcción —*building information modeling* (o BIM por sus siglas en inglés)— se han configurado como herramientas esenciales para la innovación y la gestión eficiente de proyectos (Ramos-Rivadeneira y Jiménez-Toledo, 2023).

Para la implementación exitosa de estas tecnologías, se requiere de una correcta gestión del conocimiento y el desarrollo de competencias tecnológicas en los usuarios, lo cual permite aprovechar al máximo sus beneficios. La cultura de innovación, junto con metodologías como la triangulación de información y estudios de casos de éxito, facilitan la adopción efectiva y la generación de ventajas competitivas sostenibles; asimismo, la digitalización y automatización de sistemas en la producción y gestión empresarial posibilitan la toma de decisiones en tiempo real, incrementando la eficiencia y transformando los procesos productivos y administrativos.

Tabla 3. *Aspectos metodológicos y contextuales en la innovación de tecnologías emergentes y convergentes*

Innovación como proceso sistémico y multidimensional	Recalca que la innovación en TE no se limita solo al ámbito empresarial, sino que involucra dinámicas sociotécnicas complejas que incluyen sectores industriales, gubernamentales y académicos, lo que implica la necesidad de considerar actores diversos y relaciones entre ellos para comprender plenamente el desarrollo tecnológico e innovador. Hay que tomar en cuenta que los sistemas de innovación para estas tecnologías requieren enfoques metodológicos más complejos que incluyan políticas públicas, educación, reglamentación y derechos de propiedad que condicionan el progreso y la difusión de estas tecnologías.
Contexto y territorios	Además de la innovación tecnológica en sí, el contexto social, económico e institucional genera dinámicas asimétricas de desarrollo entre regiones y países, por lo que la adecuada formulación de políticas de ciencia y tecnología podrá —y de hecho puede— modificar estos contextos para promover entornos favorables y capacidades locales para el desarrollo de tecnologías emergente. También es preciso mostrar la relevancia de “ejercicios de mapeo y evaluación” de capacidades y necesidades tanto a nivel local como global para adaptar mejor las estrategias de innovación a condiciones específicas.
Particularidad metodológica en el estudio e indicadores	Señala que los indicadores y metodologías tradicionales para medir innovación muchas veces no capturan la complejidad y las particularidades que presentan estas tecnologías, razón por la que es necesario hacer una reflexión constante y desarrollar esquemas metodológicos flexibles y adaptables que permitan incorporar las especificidades de la emergencia y convergencia tecnológica. Los procesos de innovación deben ser estudiados con rutas metodológicas que se ajusten al objeto particular de estudio, que puede partir desde la definición clara del objeto, el análisis de la cadena de valor o bien un problema complejo que involucra múltiples tecnologías.

Carácter multidisciplinario y multiactor	Complementa con la idea de que estas tecnologías convergentes implican la interacción de múltiples actores como universidades, empresas, centros de investigación, Estado y sociedad civil, todos desempeñando roles diferenciados pero complementarios en la generación y apropiación de conocimiento e innovación. Además de lo comentado, se debe resaltar la importancia de las capacidades científicas, tecnológicas, institucionales y de innovación como esenciales para el éxito de estos procesos.
Perspectiva de largo plazo y evolución	Las TE forman parte de un paradigma socioeconómico en evolución, de ahí que su estudio debe reconocer que las trayectorias tecnológicas son dinámicas y que la convergencia entre disciplinas puede generar nuevas oportunidades y desafíos que requieren evaluaciones periódicas y adaptaciones en las políticas y estrategias.
Dimensión ética, social y medioambiental	Este aspecto da a entender la relevancia de reflexionar sobre cómo las TE suscitan debates éticos, sociales y medioambientales que afectan la regulación y la aceptación social, porque la innovación en estas tecnologías es tanto técnica como económica, pero al fin y al cabo lleva implícita aspectos normativos y sociales.

Nota. Adaptado de Amaro y Robles (2020)

1.3.1. La innovación de la ingeniería civil

La innovación en el campo de la ingeniería civil, impulsada por TE, ha generado una transformación profunda en los procesos constructivos y la gestión de proyectos: el hecho de introducir herramientas digitales como el BIM, la realidad aumentada y el uso de drones ha permitido una planificación más precisa, un control mucho más eficiente de la obra y una reducción significativa de errores y costos adicionales. Estas tecnologías, junto con la incorporación de maquinaria con IA, han impulsado avances a nivel de productividad, eficiencia y calidad en los proyectos de construcción, adaptándose a un mercado cada vez más competitivo y exigente (Cecilio *et al.*, 2020).

Por otro lado, este avance tecnológico ha provocado un cambio en el perfil del profesional de la ingeniería civil, quien debe pasar de un conocimiento exclusivo en su área a adoptar una visión multidisciplinaria que integre habilidades tecnológicas y colaborativas, por lo que la gestión eficaz de los proyectos modernos requiere una cooperación estrecha entre los sectores de tecnología de la información y la ejecución de obras para maximizar los beneficios que

estas innovaciones ofrecen. Bajo este interesante contexto, la innovación se ha convertido en un factor para que las empresas constructoras mantengan su competitividad y respondan a las demandas actuales consolidando un entorno empresarial más dinámico y preparado para los desafíos futuro.

La Universidad Autónoma del Perú (s. f.) realizó un minucioso estudio sobre cómo la ingeniería civil ha vivido una transformación profunda gracias a la incorporación de TE, herramientas que están modificando la manera en que se diseñan, planifican y ejecutan las obras, y están mejorando la eficiencia, reduciendo costos y acelerando los tiempos de entrega de los proyectos. En los siguientes puntos, se exponen brevemente algunas de estas herramientas:

- **Modelado BIM.** El uso de BIM ha modernizado la forma de diseñar infraestructuras, ya que ha permitido crear modelos tridimensionales detallados antes de la construcción, lo que facilita una mejor toma de decisiones, previene errores en obra y favorece la coordinación entre equipos multidisciplinarios, lo que resulta en un uso más eficiente de los recursos.
- **Inteligencia artificial.** La IA ha contribuido en el análisis de grandes volúmenes de datos en tiempo real, lo cual ha ayudado a predecir riesgos, optimizar la planificación, reducir el uso innecesario de materiales y mejorar la sostenibilidad, además de automatizar tareas repetitivas, ayudando así a que los ingenieros puedan centrarse en labores estratégicas.
- **Impresión 3D.** La impresión 3D ha abierto nuevas posibilidades para construir estructuras de manera más rápida, personalizada y con menos desperdicio de materiales. Incluso, ya se ha logrado levantar viviendas enteras con esta tecnología, lo que evidencia su potencial transformador.
- **Materiales inteligentes.** Se están desarrollando materiales que responden activamente al entorno, como el concreto autorreparable o asfaltos que eliminan contaminantes, avances que incrementan de manera exponencial la durabilidad de las infraestructuras y disminuyen los gastos de mantenimiento.
- **Drones.** Los drones han revolucionado la supervisión de obras al hacer posibles tareas como inspecciones aéreas detalladas, seguimiento de avances y detección temprana de problemas en el terreno, así como mejorar la seguridad y optimizar el control de calidad en tiempo real.

- **Realidad aumentada.** Gracias a esta tecnología es posible visualizar modelos virtuales sobre el entorno físico; esto permite identificar errores de diseño antes de que ocurran en la obra. Su integración con herramientas como BIM promete una experiencia más interactiva y precisa.
- **Energías renovables.** El enfoque hacia soluciones sostenibles está llevando a que se incorporen tecnologías como paneles solares, turbinas eólicas o sistemas de recolección de agua en las construcciones, promoviendo infraestructuras más amigables con el medioambiente.
- **Nanotecnología.** A través de la nanotecnología se están creando materiales más duraderos, ligeros y eficientes, como cementos ultrarresistentes o pinturas autolimpiables, que alargan la vida útil de las edificaciones y reducen su impacto ambiental.

En conjunto, estas TE redefinen procesos existentes y crean nuevos paradigmas en el entorno empresarial al impulsar la innovación como un pilar central para alcanzar un posicionamiento competitivo sólido en mercados cada vez más dinámicos y globalizados. La innovación en la ingeniería civil se está dando gracias al avance constante de TE, y estas herramientas han revolucionado el sector, lo que ha permitido construir infraestructuras más seguras, sostenibles y eficientes. Conocer y aplicar estas innovaciones será clave para los futuros profesionales de esta área.

1.4. Ventajas y desventajas del uso de tecnologías emergentes en la ingeniería civil

El uso de TE en la ingeniería civil ha transformado significativamente la manera de diseñar, construir y gestionar infraestructuras. Entre sus principales ventajas destacan la reducción de costos y tiempos, el aumento de la eficiencia y productividad, el impulso hacia la sostenibilidad ambiental y la mejora de la seguridad laboral; sin embargo, también existen desventajas importantes que deben ser consideradas, como la resistencia al cambio cultural, los elevados costos iniciales de implementación y las dificultades técnicas de integración con sistemas existentes.

1.4.1. Ventajas

Reducción de costos y optimización de tiempos

Una de las ventajas más significativas y documentadas de las TE en ingeniería civil es su capacidad para reducir sustancialmente tanto los costos como los tiempos de ejecución de obras. Expertos como Galvarino, como se citó en el portal de la Universidad Católica San Pablo (s. f.), señalan que la incorporación de TE en la industria de la construcción permite reducir los costos y plazos de ejecución, y mejorar significativamente la calidad final de las obras, generando así un beneficio directo para la población.

De igual manera, la puesta en marcha de tecnologías como BIM —que se traduce o resulta en una mejora sustancial de la productividad y una reducción de costos gracias a la optimización del recurso humano necesario— y la impresión 3D ha demostrado reducir considerablemente los tiempos de construcción y minimizar el desperdicio de materiales, lo que se traduce en una mayor eficiencia económica y rentabilidad para los proyectos.

Para poner otro ejemplo, los *smart contracts* —un acuerdo entre partes que, en vez de estar escrito en papel, se programa como un código informático y se almacena en una cadena de bloques (*blockchain*)— han mostrado un potencial significativo para reducir costos y tiempos a través de la automatización de procesos en la industria de la construcción, eliminando intermediarios y agilizando procedimientos tradicionalmente lentos.

Mejora en la eficiencia y productividad

Las TE vienen transformando los niveles de eficiencia y productividad en el sector de la ingeniería civil. La impresión 3D ofrece ventajas notables, como la configuración de procesos para minimizar el consumo de materias primas y generar menos desperdicios, la reducción en la necesidad de supervisión constante y una eficiencia significativamente mayor con menos errores en comparación con los métodos tradicionales.

De igual forma, según Gómez-Valdés *et al.* (2023), la metodología BIM permite una colaboración sin precedentes entre todos los especialistas involu-

crados en un proyecto, lo que facilita el trabajo simultáneo en un mismo archivo y mejora sustancialmente el flujo de trabajo, especialmente en las etapas iniciales. Esta optimización se traduce directamente en un aumento notable de la productividad y una reducción significativa de los errores durante la etapa constructiva.

Sostenibilidad y reducción del impacto ambiental

Las nuevas tecnologías facilitan el diseño y la construcción de edificaciones significativamente más sostenibles y respetuosas con el medioambiente; desde el uso de materiales ecoamigables hasta la optimización de la eficiencia energética, estas innovaciones están contribuyendo de manera decisiva a reducir la huella ambiental de la industria de la construcción.

Para poner el mismo caso, según el Departamento de Redacción de Editorial Protiendas S. L. U. (s. f.), en la impresión 3D, el proceso constructivo puede configurarse para minimizar el consumo de materias primas y generar prácticamente cero desperdicios, reduciendo significativamente el impacto ambiental de la obra. Desde la perspectiva de sostenibilidad, se destaca que en la fabricación aditiva el desperdicio de material es casi inexistente, gracias a la posibilidad de cuantificar con precisión la cantidad exacta de insumos requeridos para cada diseño.

Incremento en la seguridad laboral

Las TE han contribuido significativamente a mejorar las condiciones de seguridad en las obras de construcción. La impresión 3D, por ejemplo, reduce notablemente los riesgos asociados a la accidentalidad de los trabajadores al disminuir la necesidad de ejecutar tareas potencialmente peligrosas, especialmente en comparación con los métodos tradicionales de elaboración de encofrados y otras estructuras temporales (Tabassum y Ahmad, 2023). Adicionalmente, estas tecnologías permiten una reducción considerable de riesgos durante trabajos en ambientes hostiles o peligrosos, lo que contribuye a la disminución global de accidentes laborales en el sector de la construcción.

1.4.2. Desventajas

Resistencia a la adopción y cambio cultural

A pesar de sus evidentes beneficios, la adopción de TE en el sector de la ingeniería civil enfrenta resistencias significativas. El sector de la construcción es tradicionalmente conservador y frecuentemente reacio a implementar nuevas tecnologías, debido en gran parte a la tendencia de los profesionales a mantener los procesos constructivos con los que están familiarizados desde su formación académica (Universidad Católica San Pablo, s. f.).

Esta resistencia cultural representa un obstáculo considerable para la modernización del sector y la obtención de todos los beneficios que las nuevas tecnologías podrían aportar. La transformación tecnológica requiere no solo implementación de herramientas, sino también un cambio profundo en la mentalidad y los procesos de trabajo establecidos durante décadas.

Costos iniciales de implementación

Aunque a largo plazo las TE han demostrado ser capaces de reducir significativamente los costos totales de construcción, la inversión inicial necesaria para su implementación puede ser sustancial. Este factor económico representa una importante barrera de entrada, especialmente para pequeñas y medianas empresas del sector que no cuentan con el capital suficiente para realizar estas inversiones.

Los costos iniciales no se limitan a la adquisición de *software* o *hardware*, sino que también incluyen capacitación del personal, reestructuración de procesos y posibles interrupciones temporales en la productividad durante el período de transición e implementación.

Limitaciones técnicas e integración con sistemas existentes

Las TE presentan también limitaciones técnicas que pueden dificultar su implementación generalizada en el campo de la ingeniería civil. En el caso específico de los *smart contracts*, por ejemplo, existe una integración limitada con los sistemas de gestión existentes y una escasez de investigación específica aplicada al sector de la construcción, factores que obstaculizan significativamente su implementación a gran escala (Rodríguez, 2023).

La integración de nuevas tecnologías con sistemas ya establecidos se ha convertido en un desafío técnico y logístico considerable. La incompatibilidad entre plataformas, la necesidad de migrar datos históricos y la adaptación de procesos existentes son obstáculos que requieren soluciones técnicas complejas y planificación cuidadosa.

Si bien estas tecnologías prometen grandes beneficios, también requieren una adecuada planificación, formación y adaptación para ser aprovechadas de manera efectiva y responsable.

1.5. Ingeniería civil: desafíos de la aplicación de las tecnologías emergentes en la actualidad

La aplicación de las TE enfrenta diversos desafíos que trascienden lo puramente técnico y requieren una profunda reflexión ética y humanista. A continuación, se presentan las conceptualizaciones acerca de los retos que enfrenta toda tecnología emergente en materia de: a) ética y humanismo en la integración tecnológica; b) control y autonomía en entornos tecnológicos; c) comprensión y gestión de la complejidad transcompleja; d) naturaleza disruptiva y convergente de las tecnologías; e) desafío de la educación y formación continua, y f) impactos sociales y culturales.

Para precisar los puntos arriba expuestos, Pérez (2024) hace una sólida explicación de cada punto. En primer lugar, se debe aclarar que no basta con que tecnologías como la IA y los robots humanoides sean vistas como herramientas que desplazan a los humanos, sino más bien como complementos que deben incorporarse con sumo cuidado y un fuerte enfoque ético. La esencia humana debe prevalecer en este proceso, promoviendo la capacidad de entendimiento, la comunicación efectiva y la reducción de la violencia en una sociedad que cada vez depende más de estas tecnologías para interactuar y gestionar información, lo que implica que el principal reto, más que tecnológico, es meramente humano; es decir, el hecho de demostrar la capacidad de entenderse, llegar a acuerdos y valorar la diversidad para construir un bien común.

Con respecto al segundo punto, otro gran desafío radica en mantener un equilibrio adecuado entre la autonomía de las máquinas y el control humano,

porque la creciente automatización y robotización invita a la creación de modelos multidisciplinarios que integren aspectos tecnológicos, éticos, de bioseguridad, de emociones, de la cultura y de la propia condición humana, evitando así perder el control frente a un futuro en el que la interacción con las máquinas sea cada vez más estrecha y compleja. La gestión de los entornos tecnológicos se vuelve, por lo tanto, un asunto de gran relevancia para salvaguardar el bienestar social.

En el tercer punto se sostiene que el desarrollo y uso de TE se inscribe en un contexto de complejidad que desafía las formas tradicionales de aprendizaje y producción, hecho que implica desaprender paradigmas previos y estar abiertos a nuevas formas de operación y cognición que fusionan distintos saberes y tecnologías digitales. La capacidad para navegar este escenario determinará el éxito en la implementación de estas tecnologías, lo que demanda flexibilidad cognitiva y una constante actualización.

Además, el carácter disruptivo y convergente de las TE implica que múltiples disciplinas y áreas del conocimiento confluyen para dar lugar a innovaciones que transforman procesos y exigen una integración social, educativa y profesional armónica, por lo que comprender esta convergencia y canalizarla adecuadamente para el beneficio colectivo es parte del reto actual a superar.

En el ámbito educativo, las TE se han convertido en un área relevante para enfrentar estos desafíos. La formación de usuarios, profesionales y docentes que comprendan estas tecnologías, sepan usarlas responsablemente y se mantengan en un aprendizaje continuo es de suma importancia, ya que es indispensable a la hora de adaptarse a una realidad tecnológica dinámica en la que la velocidad de cambio demanda nuevas competencias y habilidades.

Es importante considerar que la integración de estas TE tiene un profundo impacto social y cultural, por lo que su adopción promueve el bienestar común y evita generar exclusiones, desigualdades o conflictos sociales. Siendo así, entonces, la clave está en fortalecer la cooperación humana y el sentido de comunidad más allá de las capacidades tecnológicas.

Para culminar, y ya adentrándose en el campo de la ingeniería civil y la construcción, que se desarrollará en los capítulos siguientes, estos retos o

desafíos de las TE también juegan un papel trascendental en su relación con la ingeniería civil, como campo que diseña y construye infraestructuras esenciales, donde pueden beneficiarla altamente pero que también enfrentará los mismos desafíos:

- **Integración de tecnologías emergentes en la construcción.** La integración de TE en la construcción, especialmente en el campo de la ingeniería civil, ha generado profundos cambios en los procesos de diseño, construcción y gestión, fomentando una mayor colaboración entre diferentes fases del proyecto y entre los distintos actores involucrados, como profesionales, inversionistas y clientes. En ese sentido, la digitalización de estos procesos, mediante herramientas como el BIM y su convergencia con tecnologías como la realidad virtual, realidad aumentada, gemelos digitales, IoT, automatización y ciberseguridad, facilita una representación visual avanzada, análisis predictivos y optimización de recursos, aunque estos avances aún requieren un enfoque sistemático para evaluar su impacto en la fuerza laboral, la tendencia general indica que estas tecnologías están transformando el sector y promoviendo una mayor eficiencia, sostenibilidad y capacidad de innovación en la ingeniería civil (Clemente y Debs, 2023).

- **Gestión ética y seguridad.** En el contexto de la ingeniería civil, la gestión ética y la seguridad relacionadas con las TE, como la IA y la robótica, protegen a los trabajadores y aseguran operaciones seguras en sitios de construcción. Entonces, se deben establecer estándares de seguridad específicos que aborden las características únicas de la interacción humano-robot en estos entornos, promoviendo la supervisión remota y el uso colaborativo de robots para minimizar riesgos y evitar lesiones. Como afirman Lianga *et al.* (2024), se trata de integrar principios éticos en la adopción de estas tecnologías para mitigar preocupaciones sobre la privacidad, la confianza y la responsabilidad, garantizando así un equilibrio entre la innovación tecnológica y la protección del capital humano en la ingeniería civil.

- **Necesidad de formación multidisciplinaria.** Una formación multidisciplinaria en ingeniería civil debe combinar conocimientos técnicos de IA con habilidades humanas, con la finalidad de mejorar la colaboración entre profesionales y sistemas inteligentes. Se debe tener en cuenta que muchos trabajadores del sector carecen de experiencia en TE, lo que dificulta su implementación. Por ejemplo, mediante una educación STEM (este tipo de educación busca desarrollar habilidades y conocimientos en campos de la ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas de manera conjunta para preparar a los estudiantes para afrontar los retos tecnológicos y científicos del mundo actual y futuro) se puede preparar a los futuros ingenieros frente a los cambios en el mercado laboral, las interacciones humano-IA y los retos éticos y sociales asociados, lo que fortalecería la formación profesional con un enfoque interdisciplinario que permita aprovechar las oportunidades de la integración humano-máquina al tiempo que se abordan sus posibles impactos económicos y sociales (Zhang *et al.*, 2021).

- **Adaptación a un entorno transcomplejo y multidisciplinar.** La ingeniería civil enfrenta el desafío de adaptarse a un entorno transcomplejo y multidisciplinar, en el que las TE —como materiales innovadores, técnicas avanzadas de monitoreo y métodos digitales— se integran para abordar problemas complejos que requieren enfoques transdisciplinarios, hecho que demanda que los profesionales desarrollen nuevas competencias para diseñar infraestructuras sostenibles y resilientes, comunicando de manera clara y accesible las soluciones para favorecer la colaboración entre especialistas y no especialistas, contribuyendo así al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y promoviendo un cambio de paradigma hacia una ingeniería civil más innovadora y comprometida con el desarrollo sostenible (Antonelli y Della, 2022).

- **Innovación en sostenibilidad y resiliencia.** Hao *et al.* (2023) destacan que la relación de ambos conceptos se basa en la integración de TE, como el monitoreo estructural inteligente (SHM) apoyado en IA, IoT y análisis de datos, para mejorar la gestión del ciclo de vida y la respuesta

ante múltiples peligros, así como en el desarrollo de materiales sostenibles y durables que reduzcan el impacto ambiental y prolonguen la vida útil de las estructuras. Establecer un marco de diseño multidimensional que incorpora la resistencia, resiliencia y gestión inteligente para enfrentar amenazas naturales y antropogénicas, optimizando así el rendimiento estructural y facilitando la restauración, permitiría avanzar hacia infraestructuras más seguras, sostenibles y adaptativas para el futuro.

En resumen, los desafíos de las TE aplicados a la ingeniería civil implican la incorporación técnica de nuevas herramientas y una profunda reflexión ética, social y educativa para que su uso sea humano, eficiente y sostenible.

CAPÍTULO II

ECONOMÍA CIRCULAR

El agotamiento de los recursos naturales, el cambio climático y la creciente generación de residuos son problemáticas propias del contexto global. Es en este contexto en que la economía circular surge como una alternativa urgente frente al tradicional modelo lineal de “extraer, producir y desechar”. Se trata de una nueva lógica económica que propone un sistema regenerativo que prolonga el ciclo de vida de los productos, reduce la presión sobre los ecosistemas y transforma la manera de producir, consumir y gestionar los recursos. Y es que su aplicación va más allá del reciclaje, ya que implica rediseñar procesos, innovar en modelos de negocio y promover un cambio cultural tanto en la ciudadanía como en las instituciones.

Este capítulo ofrece una definición clara del concepto de “economía circular”, en la que se detalla su origen, su propósito y su diferencia respecto del modelo económico tradicional. A partir de ello, se exponen los principios fundamentales que sostienen este enfoque, como la ecoconcepción, la reutilización, la reparación, el reciclaje y la optimización de recursos. Estos principios permiten orientar el diseño y la gestión de productos hacia una lógica más sostenible.

También se analizan los beneficios de adoptar el paradigma de la economía circular desde tres dimensiones principales: económica, ambiental y social. Esta clasificación permite evidenciar su impacto positivo en la reducción de costos, la mitigación del cambio climático y la mejora de la salud pública. Cada dimensión aporta argumentos sólidos para justificar su incorporación en los distintos sectores productivos.

Asimismo, se presenta a la economía circular como una estrategia esencial para alcanzar el desarrollo sostenible. Este enfoque integra objetivos económicos, sociales y medioambientales de forma sistémica. También se reconocen los retos que supone su aplicación, los cuales exigen una planificación adecuada y el compromiso de múltiples actores.

Se identifican las principales barreras que dificultan la adopción de la economía circular. Entre ellas se encuentran limitaciones tecnológicas, obstáculos estructurales, restricciones regulatorias y factores culturales. Estas barreras se hacen más evidentes en contextos de países en desarrollo, donde la transición hacia modelos circulares resulta más compleja.

Para finalizar, se ofrece un análisis profundo del sector de la construcción. Se exploran las posibilidades de aplicar los principios de la economía circular al diseño, ejecución y gestión de obras. Además, se examinan los desafíos y oportunidades que esta transición representa para los profesionales y las instituciones vinculadas a la ingeniería civil.

2.1. ¿Qué es la economía circular?

La economía circular surge como una respuesta al agotamiento de los recursos naturales y a la crisis ambiental derivada del modelo lineal tradicional de producción y consumo, que se basa en extraer, usar y desechar. Este nuevo paradigma, según Carrillo y Poma (2021), propone un sistema industrial diseñado para ser restaurador y regenerativo; de esta manera, se busca cerrar los ciclos de materiales mediante la reducción, reutilización y reciclaje, promoviendo el uso de energías renovables para minimizar los impactos ambientales. Esta transformación implica más que solo cambios tecnológicos y organizativos en las empresas; supone también una evolución cultural tanto en productores como en consumidores hacia formas de consumo más sostenibles y conscientes.

Siguiendo a Marcet *et al.* (2018), se puede definir a la economía circular como un “modelo rompedor” que pretende transformar la forma en que se produce y consume con el objetivo de lograr un modelo económico sostenible y responsable, hecho que implica dejar atrás el modelo lineal tradicional que extrae materias primas, las transforma en bienes, los utiliza y luego los desecha, generando grandes cantidades de residuos, y cambiarlo por una economía “circular” que busca una gestión eficiente de los recursos materiales y energéticos, proporcionando también oportunidades laborales para perfiles especializados en estos procesos.

A continuación, se presentan otros conceptos acerca de la definición con base en algunas autoridades e investigadores del tema:

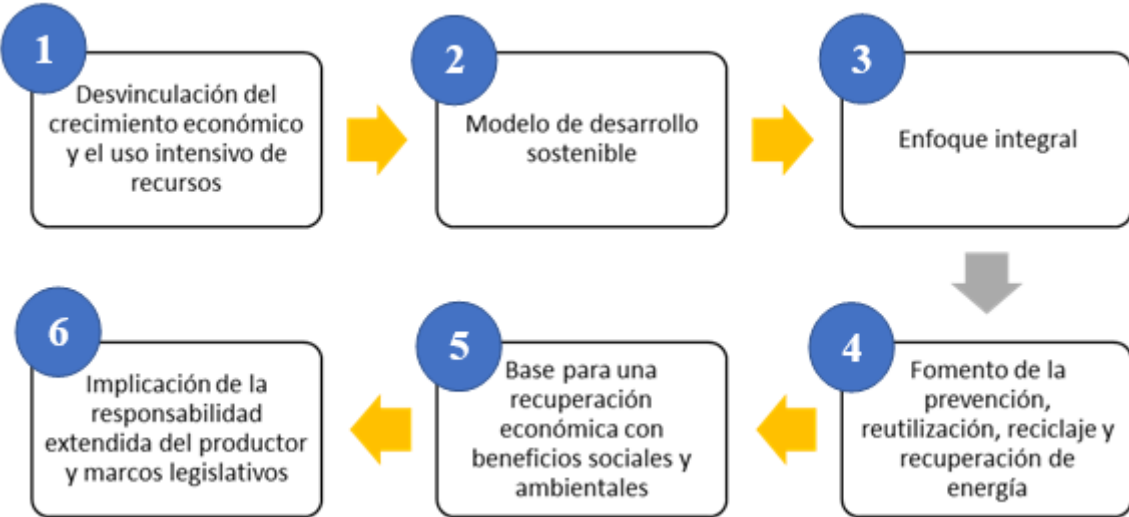
Tabla 4. *Definiciones de economía circular*

Reyes <i>et al.</i> (2022)	Describen la economía circular como un sistema que optimiza la gestión de residuos y su reutilización en todas las etapas de producción, lo cual permite desarrollar productos más ecológicos, preservar los recursos naturales renovables y hacer un uso más eficiente de los inventarios, todo esto sin causar impactos ambientales negativos en el entorno empresarial.
Carrillo y Pomar (2021)	Afirman que las generaciones más jóvenes muestran una mayor sensibilidad y disposición a adoptar prácticas que protegen los recursos naturales, lo que favorece o refuerza el concepto de economía circular como modelo sostenible.
Murray <i>et al.</i> (2017)	Definen la economía circular como un enfoque interdisciplinario que integra conceptos de sostenibilidad en los procesos de producción y consumo con la finalidad de reducir la generación de residuos y maximizar la reutilización y recuperación de materiales.
Porcelli y Martínez (2018)	Señalan que la economía circular implica un modelo de gestión de calidad orientado a procesos sostenibles, que promueve la reducción y recuperación de materiales para minimizar los impactos ambientales adversos.

Nota. Elaboración propia

También es importante mencionar las características que esta clase de economía presenta. Para ello, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe ([Cepal], 2022) argumenta al respecto mediante la siguiente figura:

Figura 1. *Propiedades de toda economía circular*



Nota. Adaptado de Cepal (2022)

Con relación a la primera característica, Cepal (2022) sostiene que la economía circular busca desacoplar el crecimiento económico del consumo de recursos naturales, para fomentar una transición hacia modelos productivos más sostenibles y desmaterializados. En el segundo aspecto, se promueve avances sociales, económicos y ambientales alineados con la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, contribuyendo a una recuperación transformadora tras la pandemia del COVID-19. El enfoque integral incluye cambios en políticas públicas, regulaciones, sistemas de gestión, finanzas públicas y capacidades desde la producción, consumo hasta la gestión final de residuos.

Por otro lado, la Cepal (2022) también resalta el fomento de la prevención, reutilización, reciclaje y recuperación de energía, ya que la economía circular impulsa una gestión sostenible de los residuos para minimizar su impacto ambiental y aprovechar sus potencialidades económicas. La penúltima característica evidencia que esta economía permite una recuperación económica con beneficios sociales y ambientales, dado que es una oportunidad para desarrollar un modelo productivo endógeno con impactos positivos para la región. Para culminar, la implementación implica también avances en legislación y políticas de gestión integral de residuos, con ejemplos de regulaciones efectivas en la región.

2.2. Principios de la economía circular

Como se ha desarrollado en el punto anterior, la economía circular es un modelo que busca transformar la manera en que se produce y consume, promoviendo un sistema sostenible y eficiente en el uso de los recursos. Para lograrlo, es necesario basarse en una serie de principios que orientan el diseño, uso y reutilización de productos, con el fin de minimizar el impacto ambiental y aprovechar al máximo los materiales a lo largo de todo su ciclo de vida. A continuación, se presentan los principales principios que sustentan este enfoque innovador con base en el estudio de Negrón-Ríos (2020):

Figura 2. *Economía circular: principios elementales*



Nota. Tomado de Negrón-Ríos (2020)

En primer lugar, la ecoconcepción implica que desde la creación de un producto se considera su impacto ambiental a lo largo de todo su ciclo de vida, buscando minimizarlo. Además, se prioriza la funcionalidad, es decir, el uso real del bien más allá de su simple posesión; luego, se fomenta el segundo uso, reintroduciendo productos que los consumidores ya no desean pero que aún pueden ser aprovechados. Con la reutilización se procura emplear nuevamente los materiales contenidos en los productos descartados para elaborar nuevos bienes, ya que con la reparación se posibilita alargar la vida útil de los productos retardando su desecho. Por última, la figura menciona el reciclaje, el cual se encarga de aprovechar los materiales de los productos que fueron descartados para reintegrarlos al ciclo productivo.

Para complementar los principios arriba mencionados, Martínez y Porcelli (2018) argumentan que estos deben estar sustentados bajo las siguientes directrices:

- **Preservar y mejorar el capital natural.** Esta directriz centra su atención en la gestión sostenible de los recursos naturales para evitar su agotamiento y asegurar la salud de los ecosistemas con el objetivo de controlar las reservas finitas y equilibrar el uso de recursos renovables mediante el diseño de productos con ciclos de desensamblado y reutilización. Esto permite que los materiales puedan regresar al sistema productivo en

lugar de convertirse en residuos. Herramientas como el ecodiseño, que considera el impacto ambiental desde la concepción del producto, y la economía funcional, que prioriza el uso eficiente frente a la propiedad, son determinantes para minimizar el derroche y favorecer sistemas que mantengan y restauren el capital natural a largo plazo.

- **Optimizar el rendimiento de los recursos.** Este principio promueve maximizar la utilidad de los productos, componentes y materiales durante todo su ciclo de vida, sea en ciclos técnicos o biológicos. Para ello, se implementan estrategias de diseño que permiten la refabricación, el reacondicionamiento y el reciclaje —conocidas como las “tres R”—, lo que prolonga la vida útil y el valor de los recursos. Optimizar el rendimiento implica, además, que los productos estén pensados para ser usados con la máxima eficiencia y puedan ser reintegrados al sistema productivo sin pérdida significativa de calidad ni funcionalidad, fortaleciendo así la resiliencia y sostenibilidad de las actividades económicas.

- **Promover la eficacia del sistema y eliminar factores negativos.** La idea es mejorar el funcionamiento integral de los sistemas económicos y sociales, detectando y eliminando elementos en el diseño o producción que generen impactos negativos para las personas y el ambiente. Bajo esta directriz, lo que se busca es reducir daños relacionados con aspectos clave como la alimentación, la movilidad, la vivienda, la educación, la salud y el ocio, promoviendo un entorno más saludable y equitativo. Para asegurar la perpetuidad de los beneficios generados por la economía circular, se debe promover el uso de fuentes de energía renovable para disminuir la dependencia de recursos no renovables y potenciar la capacidad de recuperación del sistema frente a crisis, como escasez energética o ambientales.

Estos principios, en conjunto, buscan optimizar el ciclo de vida de los materiales y aumentar la eficiencia en la producción y el consumo, contribuyendo a un modelo económico más sostenible y responsable.

2.3. Beneficios de la economía circular

La economía circular representa una visión diferente en cuanto a la producción y el consumo; asimismo, es una estrategia integral para lograr un desarrollo sostenible en el largo plazo, hay que mediante esta se busca siempre maximizar la valoración de los bienes y materiales durante el lapso de tiempo concebible, disminuyendo la emisión de residuos y el impacto ambiental. Al enfocarse en principios como la ecoconcepción, la funcionalidad, el segundo uso, la reutilización, la reparación y el reciclaje, la economía circular ofrece ciertas bondades que pueden agruparse en las tres dimensiones que la siguiente figura expone:

Figura 3. *Ventajas de la economía circular*



Nota. Elaboración propia

Para comenzar este breve análisis, en materia de beneficios económicos, se pueden establecer los siguientes indicadores:

- **Reducción de costos y seguridad de recursos.** La economía circular permite a las organizaciones tener un descenso significativo en sus costos operativos mediante la reutilización y el reciclaje de materiales, evitando el requerimiento dependiente de la generación de nuevos recursos (Almeida-Guzmán y Díaz-Guevara, 2020). Esto se traduce en ahorro directo y una mejora en la confiabilidad de suministro de los materiales

base, factor especialmente relevante en un contexto mundial de insuficiencia e irregularidad de los precios.

Hay que tener en cuenta que la economía circular mejora la seguridad de los recursos y reduce el vínculo de las importaciones de materias primas, lo que representa un beneficio estratégico para las economías nacionales y las empresas. Al utilizar los residuos locales como principal fuente de materia prima, se favorece una menor dependencia externa y se fortalecen las cadenas de valor locales.

- **Innovación y crecimiento empresarial.** La transición hacia modelos circulares promueve que las organizaciones empresariales innoven, dando lugar a nuevos espacios de crecimiento en cuanto a las oportunidades económicas. Al diseñar productos enfocados en la reutilización y el reciclaje, las empresas fomentan la investigación de novedosas estrategias productivas, consumistas y de gestión de los recursos, lo que les permite crear nuevas oportunidades de negocio y diferenciarse en mercados cada vez más competitivos (Piloto, 2023).

- **Mejora de la eficiencia y competitividad.** Para Castro *et al.* (2024), el optimizar la utilización de recursos, con la finalidad de minimizar los costos de operación y minimizar la dependencia de materias primas vírgenes mediante prácticas como el reciclaje y la remanufactura, incrementa la eficiencia operativa y proporciona una ventaja competitiva en mercados con fluctuaciones en los precios de insumos. Además, al adoptar modelos sostenibles y acceder a nuevos mercados emergentes atraídos por soluciones ecológicas, las empresas fortalecen su reputación y fidelidad del cliente.

Con respecto a los beneficios ambientales, los respectivos indicadores o parámetros para medirlo, según algunos investigadores, serían los siguientes:

- **Protección del medioambiente y reducción de impactos.** Sabiendo que la economía circular promueve un enfoque sistémico que considera la interconexión entre la energía producida, los materiales extraídos y el medio natural, buscando minimizar los impactos ambientales negativos, se reconoce que la implementación de cadenas de suministro circulares

que genera una influencia significativa ambiental, tal como la atenuación de residuos y descargas nociva.

Sin embargo, Hungaro *et al.* (2021), asumen que, para que estas iniciativas funcionen eficazmente los gobiernos, industrias y comunidades deben colaborar entre sí y aplicar políticas que incentiven el proceso hacia las formas de consumo y producción, respetando el medio ambiente. La incorporación de prácticas como la producción limpia, la logística inversa y la cooperación empresarial son fundamentales para conseguir estas metas y garantizar la sustentabilidad económica y ambiental.

- **Mitigación del cambio climático.** Tal como sostienen Valiente y Turro (2024), la mitigación implica acciones como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero mediante prácticas que promueven el uso de energías renovables, la conservación de ecosistemas y la eficiencia energética, las cuales facilitan la implementación de modelos de economía circular que se basan en la reducción, reutilización y reciclaje de materiales para disminuir la generación de residuos y la extracción de recursos naturales. De esta forma, se contribuye con mejorar la salud ambiental, la resiliencia climática y el bienestar económico a largo plazo.

No menos importantes y trascendentales son los beneficios sociales, los que pueden enumerarse a continuación:

- **Creación de empleo y nuevas oportunidades laborales.** La economía circular beneficia la creación de nuevos empleos en sectores como el reciclaje, la reparación y la refabricación, sectores que demandan una mayor intervención humana que el modelo lineal tradicional de producción y consumo, por lo que generan más oportunidades de trabajo.

Almeida-Guzmán y Díaz-Guevara (2020) señalan que la transición hacia una economía circular puede generar empleos de calidad en diversas áreas, especialmente en aquellas relacionadas con la gestión sostenible de recursos siendo este potencial de creación de empleo uno de los beneficios sociales más tangibles del modelo circular.

- **Mejora de la salud pública.** La economía circular contribuye significativamente a la mejora de la salud pública al reducir la contaminación ambiental y la exposición a sustancias tóxicas. Por ejemplo, el Banco de Desarrollo de América Latina (2018) sostiene que un manejo inadecuado de residuos genera emisiones significativas de gases de efecto invernadero que afectan el cambio climático y, por ende, la salud ambiental y humana. Incorporar la economía circular reduce el uso de materias primas y disminuye estas emisiones, lo que contribuye a mitigar problemas ambientales relacionados con la salud pública, además de que el manejo eficiente de residuos sólidos puede prevenir problemas sanitarios derivados de la contaminación y acumulación de desechos, mejorando así las condiciones de salud de la población.

- **Promoción de comportamientos sostenibles.** Otro beneficio social importante de la economía circular es su capacidad para promover comportamientos más sostenibles entre los consumidores. Al respecto, dicen Almeida-Guzmán y Díaz-Guevara (2020) que al normalizar prácticas como la reutilización, la reparación y el reciclaje, la economía circular lo que estaría fomentado sería una cultura de consumo más responsable y consciente de los impactos ambientales.

Entonces, como se ha podido apreciar, la economía circular fomenta la creación de nuevos parámetros de negocio ambiental estimulando la competencia entre las empresas, por lo que estas organizaciones activan prácticas circulares y de esta manera pueda haber una mejora en el posicionamiento dentro del mercado, esto es a que tanto consumidores como inversionistas respeten con mayor frecuencia la sostenibilidad al momento de tomar las decisiones.

2.4. La economía circular como estrategia para el desarrollo sostenible

La economía circular es una estrategia esencial y emergente para el desarrollo sostenible. Se ha constituido en un sistema regenerativo que busca minimizar los insumos de recursos y la generación de residuos, emisiones y pérdidas energéticas a través de prácticas como el diseño duradero, la reparación,

la reutilización y el reciclaje. Si se la une con la sostenibilidad, generaría un equilibrio entre el desempeño económico, la inclusión social y la resiliencia ambiental, que beneficiará tanto a las generaciones actuales como a las futuras.

De igual forma, la economía circular es considerada como una condición necesaria e, incluso, una solución principal para lograr sistemas sostenibles, particularmente en el ámbito ambiental. No obstante, Geissdoerfer *et al.* (2017) reconocen que la economía circular por sí sola no basta para alcanzar la sostenibilidad, ya que esta última requiere transformaciones más amplias, incluyendo cambios en estilos de vida y otras dimensiones sociales y económicas. A pesar de ello, la economía circular aporta beneficios significativos en términos de uso eficiente de los recursos, generación de empleo y crecimiento económico, pues se la contempla como una estrategia clave dentro del conjunto de acciones orientadas hacia el desarrollo sostenible.

La economía circular ha ganado relevancia a nivel global, pues ha sido incorporada en políticas y regulaciones de países como Alemania, Japón y China, así como en estrategias de la Unión Europea, tal como refieren Geissdoerfer *et al.* (2017). Esta institucionalización refleja el reconocimiento de la economía circular como una herramienta para avanzar hacia el desarrollo sostenible, remarcando la trascendencia de la colaboración entre diferentes actores y la implementación de normativas e incentivos adecuados para facilitar su adopción.

Ahora bien, la economía circular no debe entenderse de forma aislada ni jerárquica frente a otras estrategias de sostenibilidad, sino que debe ser vista o estudiada como un enfoque que puede y debe integrarse con otros, especialmente para abarcar de manera holística los aspectos sociales, económicos y medioambientales, consolidando así un camino hacia un desarrollo verdaderamente sostenible.

En la Tabla 5 se presentan hallazgos clave extraídos del análisis de unas 114 definiciones académicas y prácticas sobre la economía circular estudiadas por Kirchherr *et al.* (2017), puntos de vista que evidencian cómo, si bien la economía circular es ampliamente reconocida como una estrategia emergente para el desarrollo sostenible, existen importantes áreas de mejora en su conceptualización y aplicación:

Tabla 5. *Economía circular y manejo de la sostenibilidad*

Enfoque 3R (reducir, reusar, reciclar)	El estudio encuentra que la mayoría de definiciones de economía circular se centran en reducir, reutilizar y reciclar; sin embargo, pocas destacan la necesidad de un cambio sistémico profundo, por lo que es importante recalcar que la economía circular, además de enfocarse en actividades puntuales, también debe transformar todo el sistema económico para maximizar su efectividad hacia el desarrollo sostenible.
Foco en la prosperidad económica más que en la equidad social	La economía circular es definida principalmente con un objetivo de prosperidad económica que relega la equidad social y la consideración de generaciones futuras a un segundo plano, lo que sugiere que, para que la EC sea una estrategia integral de desarrollo sostenible, se deben fortalecer la dimensión social y la justicia intergeneracional.
Importancia de la perspectiva sistémica a nivel micro, meso y macro	La economía circular ha de incorporarse a diferentes escalas —desde el diseño de productos (micro), pasando por ecoindustrial <i>parks</i> o <i>clusters</i> (meso), hasta la reorganización económica y regulatoria a nivel nacional o global (macro)—, integración multiescalar que se requiere para una verdadera transición sostenible.
Necesidad de integración con otras estrategias de sostenibilidad	La economía circular no debe verse aislada ni jerárquica, sino como parte de un conjunto de estrategias complementarias que incluyen aspectos sociales, ambientales y económicos, para así alcanzar el desarrollo sostenible en sentido amplio

Nota. Adaptado de Kirchherr *et al.* (2017)

Para que la economía circular funcione como una estrategia efectiva hacia la sostenibilidad, tiene que trascender la simple gestión de materiales y residuos, y orientarse hacia una transformación sistémica que integre de manera plena las dimensiones del tipo ambiental, social y económica; sin embargo, es imprescindible reconocer y fortalecer el papel de los modelos de negocio innovadores y el compromiso de los consumidores como motores para la transición.

2.5. Barreras para implementar la economía circular

A pesar de los evidentes beneficios ambientales y el potencial económico, es necesario mencionar las numerosas barreras que dificultan la implementación efectiva de la economía circular, especialmente en países en vías de desarrollo

como Perú, por lo que en este apartado se estudiará un marco comprensivo preparado para entender los desafíos que enfrentan empresas, Gobiernos y sociedades en la transición hacia modelos circulares.

La literatura científica reciente ha identificado cuatro categorías principales de barreras: tecnológicas, estructurales/organizacionales, institucionales y culturales, y de categorización, que exponen un análisis sistemático de los obstáculos e identificación de estrategias específicas para abordarlos (Medina y Freire, 2023).

Barreras tecnológicas

La falta de infraestructura tecnológica es uno de los principales obstáculos para la implementación de la economía circular, dado que las empresas frecuentemente carecen del equipamiento y los procesos especializados necesarios para adoptar prácticas circulares. Tal como Medina y Freire (2023) argumentan, esta barrera es particularmente pronunciada en países en vías de desarrollo, donde el acceso a tecnologías avanzadas puede ser muy limitado por razones económicas e incluso logísticas.

Para poner un ejemplo, en el campo de la electrónica, los desafíos técnicos pueden manifestarse en forma de contradicciones entre diferentes objetivos de diseño circular (Medina y Freire, 2023). Resalta el caso de la modularidad de componentes, que facilita el desmontaje y reciclaje, y puede entrar en conflicto con la optimización energética que se logra con componentes más integrados; de igual forma, la industria 4.0 y las tecnologías digitales avanzadas podrían contribuir a superar algunas de estas barreras al mejorar la toma de decisiones y el desarrollo de estrategias en empresas interesadas en transitar hacia modelos circulares; sin embargo, la adopción de estas tecnologías requiere inversiones significativas y conocimientos especializados que no siempre están disponibles.

Para Do Nascimento y De Souza (2020), entre los principales obstáculos tecnológicos se encuentra el déficit de tecnologías adecuadas para el manejo y reciclaje eficiente de materiales complejos, como los desechos electrónicos o neumáticos usados, que representan un desafío ambiental, económico y tecnológico importante; además, la insuficiencia de procesos catalíticos limpios y la necesidad de desarrollar baterías recargables mejoradas son

ejemplos concretos de retos tecnológicos que requieren innovación para avanzar hacia sistemas más sostenibles. En este contexto, también se destaca la importancia de implementar tecnologías de bajo costo y amigables con el medioambiente, que puedan ser adoptadas a gran escala para limitar impactos como el calentamiento global.

Barreras estructurales y organizacionales

Las barreras estructurales y organizacionales para la adopción de prácticas de economía circular destacan principalmente la falta de conocimiento técnico y la escasez de experiencia dentro y fuera de las organizaciones. Tal como afirman Melati *et al.* (2021), estas barreras son consideradas las principales dificultades que enfrentan las empresas para realizar la transición hacia modelos circulares al constituirse verdaderos obstáculos financieros relacionados con la estructura interna de las empresas, la escasa disponibilidad de apoyo financiero externo y los altos costos iniciales como factores que complican esta transición.

Asimismo, la ausencia de un soporte institucional adecuado, incluyendo regulaciones claras, incentivos gubernamentales y un entorno que facilite la colaboración entre actores empresariales y políticas públicas, dificulta la integración de prácticas circulares. Por ello, Melati *et al.* (2021) destacan la necesidad de un enfoque sistémico en el que Gobiernos, empresas y otros actores trabajen de manera conjunta para transformar estas barreras estructurales y organizacionales en habilitadores que impulsen el cambio hacia una economía circular efectiva.

Barreras institucionales y regulatorias

Las barreras institucionales y regulatorias en la economía circular se han constituido como verdaderos desafíos para su adopción efectiva según el análisis presentado por Almeida-Guzmán y Díaz-Guevara (2020), quienes indican que ello implica superar barreras políticas y relacionadas con la gobernanza de infraestructuras, así como financieras, que aún están presentes en varios países. La falta de políticas públicas claras y estrategias integrales limita la gestión holística de los recursos y dificulta la transición hacia modelos circulares, especialmente en países en vías de desarrollo, donde la adopción de estas políticas es aún incipiente

Por otra parte, Castro (2024) destaca que la incertidumbre regulatoria y la ausencia de incentivos fiscales específicos son obstáculos significativos para la implementación de la economía circular. A pesar de que algunos Gobiernos han comenzado a establecer normativas para promover prácticas circulares, muchas regiones carecen de un marco legislativo coherente que obligue o motive a las empresas a invertir en procesos de economía circular a largo plazo; entonces, esta carencia de claridad normativa desalienta las inversiones y frena la innovación necesaria para avanzar en este modelo económico.

Barreras culturales y de conocimiento

En este aspecto, Cepal (2022) señala que en Europa esta barrera se manifiesta en la falta de interés y conciencia de los consumidores, así como en una cultura empresarial fluctuante que limita la adopción de prácticas sostenibles, realidad que subraya la necesidad de empoderar a los consumidores y promover un cambio cultural que favorezca el diseño sostenible de productos y patrones de consumo responsables. América Latina y el Caribe no son ajenos a tal realidad, pues en estas regiones también persisten limitaciones, lo que hace imperante diseñar y fortalecer estrategias propias que contribuyan a generar conciencia y compromiso social y empresarial frente a la economía circular.

Estas barreras culturales se refieren a la falta de información y al entramado de normas, prácticas y valores que dificultan la aceptación y aplicación de tecnologías y modelos circulares innovadores. Por ejemplo, la implementación de tecnologías como las cadenas de bloques, que pueden potenciar la trazabilidad y eficiencia en la economía circular, enfrenta obstáculos normativos, institucionales y tecnológicos que están estrechamente relacionados con la falta de conocimiento y resistencia a cambios sistémicos.

2.6. La economía circular en el campo de la construcción

La economía circular en el campo de la construcción es un modelo que busca maximizar la durabilidad y reutilización de materiales a lo largo de todo el ciclo de vida de una edificación, desde el diseño hasta la construcción. Este enfoque, según la Corporación de Desarrollo Tecnológico de la Cámara Chilena de la Construcción ([CDTCCC], 2020), propone cambiar el paradigma

lineal tradicional de “extraer-usar-desechar” por uno que facilite el diseño libre de residuos y contaminación, mantenga productos y materiales en uso el mayor tiempo posible, y regenere los sistemas naturales. En la construcción, esto implica considerar principios de diseño que promuevan la eficiencia en el uso de materiales, la adaptabilidad y la capacidad de desensamblaje, así como gestionar los residuos como recursos valiosos para nuevos procesos productivos.

Además, la economía circular fomenta la adopción de nuevos modelos de negocio y la industrialización, por ejemplo, mediante tecnologías como la construcción modular e industrializada, que permiten una planificación más detallada y eficiente, la reducción de residuos y tiempos, y una mayor coordinación entre actores del proceso constructivo. Esto contribuye tanto a una mayor sustentabilidad ambiental y reducción del impacto en la extracción de recursos y generación de residuos, así como traer beneficios económicos y sociales, como mejoras en productividad y calidad en las obras (CDTCCC, 2020). De esta manera, la economía circular se posiciona como una estrategia clave para avanzar hacia una industria de la construcción más sostenible a nivel mundial.

Ahora bien, el papel de cada agente en el sector de la construcción dentro de la economía circular es diverso y complementario, por ejemplo, las administraciones públicas, tanto estatales como locales, son agentes transversales que regulan y promueven políticas, gestionan licencias y residuos, y pueden incentivar la contratación pública sostenible con criterios de economía circular, además de fomentar colaboraciones entre actores del sector para promover sinergias como la simbiosis industrial; por otro lado, están los extractores de materias primas, que suministran recursos básicos como áridos y madera, y cuya gestión inadecuada puede ser ambientalmente dañina, por lo que su papel es crítico para asegurar una extracción responsable y sostenible (Fundación Conama, 2018).

Además, el sector de la construcción está compuesto por numerosos profesionales de distintas áreas —ingenieros, industriales, gestores de residuos, usuarios, entre otros— que actúan en diferentes fases del proceso constructivo. La coordinación, el intercambio de conocimientos y la colaboración entre estos agentes son esenciales para abordar las dificultades de cada etapa y aprovechar

oportunidades que impacten positivamente en fases posteriores. En suma, el trabajo conjunto entre autoridades, proveedores de materias primas, profesionales técnicos y usuarios finales es fundamental para avanzar hacia un modelo circular que potencie la durabilidad, reutilización y eficiente gestión de recursos en la construcción.

Finalmente, los principales retos y barreras para el desarrollo de una economía circular que el sector de la construcción afronta es la necesidad de un cambio conceptual y cultural entre todos los actores, junto con la adopción de nuevos modelos de producción, negocio, gestión y gobernanza. El hecho de establecer un lenguaje común y un esquema conceptual claro se debe a la complejidad y diversidad de profesionales implicados en la cadena de valor. También hay que tener en cuenta que existen trabas administrativas importantes, como las figuras legales de subproducto y fin de la condición de residuo, que dificultan la reutilización y reciclaje en la construcción. Por último, hay que mejorar la formación, capacitación y sensibilización tanto de los profesionales del sector como de la sociedad para así incentivar el entendimiento y la demanda de productos y servicios circulares.

CAPÍTULO III

TECNOLOGÍAS EMERGENTES Y ECONOMÍA CIRCULAR EN INGENIERÍA CIVIL

La ingeniería civil atraviesa una etapa de transformación profunda, impulsada por dos fuerzas convergentes: las tecnologías emergentes y la economía circular. La necesidad de desarrollar infraestructuras más resilientes, eficientes y sostenibles ha motivado la incorporación de herramientas digitales avanzadas y enfoques regenerativos para la gestión de materiales. Esta nueva visión no solo busca mejorar la productividad y la seguridad de los proyectos, sino que también plantea una respuesta concreta a los desafíos ambientales y sociales del siglo XXI.

En este contexto, el capítulo examina cómo la innovación tecnológica y la circularidad están redefiniendo la práctica contemporánea de la ingeniería civil. Para ello, la sección se estructura en diferentes apartados que abordan de manera progresiva los principales avances del sector y su aplicación práctica.

Primero se presenta una visión general del papel de la tecnología en la ingeniería civil. Se destacan herramientas como el modelado digital, los sensores inteligentes, la computación en la nube y los gemelos digitales, los cuales ya muestran un impacto significativo en el diseño y la gestión de obras.

Luego se profundiza en los avances tecnológicos aplicados al sector construcción. Se abordan temas como la automatización, la robótica, la impresión 3D, el desarrollo de materiales innovadores y la integración con plataformas como BIM. Estos desarrollos no solo incrementan la eficiencia operativa, sino que también habilitan nuevas formas de concebir, construir y mantener infraestructuras inteligentes.

El capítulo también analiza casos concretos de aplicación de tecnologías emergentes en la ingeniería civil. Se examinan ejemplos vinculados a la realidad aumentada, el internet de las cosas, los drones, la manufactura aditiva y los entornos colaborativos en la nube. Además, se incluye una revisión detallada

del papel estratégico de la inteligencia artificial y el *big data* en la construcción, destacando su capacidad para optimizar recursos, anticipar fallas, automatizar procesos y fortalecer la toma de decisiones basada en datos.

Finalmente, se introduce el concepto de economía circular en el contexto de los residuos de construcción. Se resalta su potencial para reducir impactos ambientales, promover la innovación con materiales reciclados y redefinir el valor de los desechos como insumos útiles. Asimismo, se exponen métodos actuales para la gestión y el tratamiento de estos residuos, se identifican los desafíos que enfrenta el sector y se plantea la necesidad de adoptar una gestión integral que responda a criterios de sostenibilidad y eficiencia en los ciclos constructivos.

3.1. La tecnología en ingeniería civil

Durante los últimos años, la ingeniería civil ha vivido una transformación profunda gracias al avance de las tecnologías digitales. Desde 2018 hasta 2025, el sector ha adoptado herramientas propias de la llamada Cuarta Revolución Industrial, lo que ha dado paso al concepto de “Construcción 4.0” (Al Mawlani y Al Mubarak, 2024), término que se refiere a la integración de tecnologías como el modelado digital, los sensores inteligentes, el análisis de datos y la IA en los distintos procesos que conforman un proyecto de infraestructura; lo que antes parecía propio del ámbito industrial o de la informática, hoy forma parte cotidiana del mundo de la construcción.

Uno de los avances más importantes en la ingeniería civil ha sido la adopción de tecnologías digitales que permiten la creación de infraestructuras inteligentes mediante la integración de sensores conectados y sistemas de monitoreo en tiempo real. Estas tecnologías, como el IoT, junto con plataformas en la nube y el BIM, facilitan la recopilación continua de datos sobre el estado de puentes, edificios y carreteras, lo que permite simular y controlar su comportamiento digitalmente a lo largo de todo su ciclo de vida (Sales *et al.*, 2024). Esto no solo mejora la seguridad y eficiencia en el mantenimiento, sino que también prolonga la vida útil de las estructuras y reduce costos operativos a largo plazo,

algo que representa un cambio disruptivo en la gestión de proyectos de construcción.

Los métodos de trabajo han evolucionado considerablemente, puesto que hoy en día, antes de colocar una piedra en el terreno, es posible crear modelos virtuales detallados de una obra, como los llamados “gemelos digitales”, que son réplicas virtuales de estructuras físicas conectadas a datos en tiempo real, los cuales permiten simular distintas situaciones y anticipar problemas antes de que ocurran (Cotoarbă *et al.*, 2024). El uso de estos modelos ha demostrado ser propicio para optimizar recursos, evitar errores durante la construcción y tomar decisiones más informadas. Por otro lado, esta práctica se complementa con el trabajo colaborativo en la nube, en el que arquitectos, ingenieros y otros profesionales pueden intervenir de modo simultáneo sobre un mismo modelo digital.

Asimismo, la incorporación de estas tecnologías también ha tenido un fuerte impacto en la formación de los futuros ingenieros civiles, por lo que en universidades de todo el mundo se han comenzado a utilizar herramientas como la realidad aumentada y la realidad virtual para enriquecer la enseñanza. Gracias a ellas, los estudiantes pueden explorar una obra en tres dimensiones o simular la ejecución de un proyecto sin necesidad de estar físicamente en el lugar. Estas experiencias inmersivas no solo mejoran la comprensión de conceptos complejos, sino que también aumentan el interés y el rendimiento académico. Al respecto, estudios como el de Kraus *et al.* (2022) han reportado mejoras significativas en los casos en que se aplicaron estas tecnologías en clase, además de que se ha vuelto cada vez más común que los planes de estudio incluyan asignaturas relacionadas con programación, análisis de datos y nuevas tecnologías.

En la fase de planificación y ejecución de las obras, la tecnología también ha tenido un papel protagónico, pues existen programas especializados para crear cronogramas más precisos, monitorear el avance del proyecto y analizar datos en tiempo real. El uso de drones, cámaras y sensores facilita el seguimiento constante de las obras, y permite corregir desvíos a tiempo; sin embargo, aún existen desafíos por superar (Tulk, 2018). En muchos sitios de construcción, la

maquinaria y los sistemas digitales aún no se comunican de forma fluida, lo que genera retrasos y costos adicionales; para enfrentarlos, se están diseñando plataformas digitales que buscan integrar toda la información de la obra en un solo sistema, facilitando la coordinación entre los distintos actores del proyecto.

3.2. Avances de la tecnología en la construcción: panorama general

Tradicionalmente, la construcción es un sector de baja productividad y elevado uso de mano de obra, caracterizado por inversiones tecnológicas reducidas; sin embargo, en las últimas décadas ha comenzado a adoptar innovaciones impulsadas por la necesidad de eficiencia y sostenibilidad. Estudios recientes como el de Hossain *et al.* (2020) señalan que tecnologías de automatización, como la impresión 3D, pueden automatizar procesos de construcción y ahorrar mano de obra, materiales y tiempo de obra; de igual forma, la automatización con robots, drones y sistemas digitales está recibiendo cada vez más atención como respuesta a problemas de escasez de trabajadores y a los estrictos requerimientos de calidad y seguridad.

Materiales innovadores y sostenibilidad

Los avances en materiales de construcción se orientan hacia composiciones más sostenibles y de alto desempeño. Firoozi *et al.* (2024) clasifican estos materiales en sustancias naturales (bambú, cáñamo), productos reciclados (hormigón triturado, plásticos reciclados) y composites avanzados (como polímeros reforzados con fibra), además del uso de técnicas de fabricación avanzada —impresión 3D y fabricación automatizada—, que aumentan la eficiencia productiva y reducen el desperdicio en obra. Por ejemplo, estudios recientes muestran que en concretos autocompactantes la adición de fibras híbridas (híbrido metálico y sintético) mejora la resistencia mecánica y minimiza la fisuración, mientras que aditivos como cenizas volantes incrementan la resistencia a compresión (Adamari *et al.*, 2023). Estas innovaciones permiten reemplazar parte de los materiales tradicionales (cemento Portland, áridos vírgenes) por alternativas de bajo contenido de carbono; no obstante, el uso de nuevos materiales enfrenta retos como altos costos iniciales, complejidad

técnica e incertidumbre regulatoria. Aun así, la investigación destaca que con mayor escala y colaboración interdisciplinaria se podrían superar esas barreras y lograr construcciones más ecológicas y resilientes (Firoozi *et al.*, 2024).

Automatización y robótica

La industria de la construcción está incorporando cada vez más sistemas automatizados y robóticos para tareas repetitivas o peligrosas. Realidad virtual, aumentada y mixta, así como drones y brazos robóticos, se exploran como herramientas de apoyo en el diseño, la inspección y la ejecución de obras, por ejemplo, exoesqueletos o cámaras con sensores permiten a los operarios simular y corregir obras en tiempo real. Según Xiao *et al.* (2022), la robótica de construcción ha avanzado integrando manufactura aditiva, IA y BIM para abordar problemas de tareas específicas (como la colocación de prefabricados, soldadura), algoritmos de planificación y colaboración hombre-robot. Los autores sugieren líneas futuras como la fabricación robótica *in situ* (cerca del sitio de obra) y la colaboración multirobot, así como una mayor integración de BIM con sistemas robóticos para automatizar el flujo de trabajo. Un caso notable es el de los robots ladrilleros (como Hadrian X), que levantan estructuras a partir de modelos CAD, mejorando la velocidad y la seguridad al reducir la labor manual y el tiempo de fraguado de mortero. En resumen, la robótica potencia la productividad y seguridad en obra, aunque requiere inversión en desarrollo de *software* y *hardware* especializado.

Impresión 3D en la construcción

La impresión 3D de concreto u otros materiales ha emergido como una tecnología transformadora porque permite construir formas complejas y personalizadas con capas de material depositado por robot, con ventajas importantes: menor consumo de material residual y tiempos de obra más cortos. Tu *et al.* (2023) han revisado los avances en 3DCP y señalan que ajustar la mezcla, por ejemplo, incorporando cenizas o arenas recicladas, mejora su trabajabilidad, aunque un exceso de aditivos puede reducir la resistencia inicial. Dicha técnica ha sido aplicada en la impresión de viviendas modulares, puentes peatonales y elementos estructurales, lo cual demuestra viabilidad técnica y ahorro de mano de obra; además, al combinarse con BIM, se facilita la planificación digital

de los elementos a imprimir. Sin embargo, su adopción masiva depende de mejorar el control del fraguado, la durabilidad de las estructuras impresas y los marcos normativos adecuados.

Sensores inteligentes y monitoreo

Los sensores inteligentes y el IoT están revolucionando el monitoreo y mantenimiento de infraestructuras. Por ejemplo, sensores avanzados (piezoeléctricos, fibra óptica, MEMS, GPS, entre otros) con comunicación inalámbrica permiten medir en tiempo real deformaciones, vibraciones, temperatura y otros parámetros críticos de la estructura (Sivasuriyan *et al.*, 2024). En el monitoreo estructural, esta telemetría remota reduce la necesidad de inspecciones manuales y habilita análisis predictivos, alertando tempranamente de daños o deterioros incipientes. En la práctica, los sistemas IoT en obra recogen datos de rendimiento de maquinaria y condiciones ambientales para optimizar consumos de energía y programar mantenimientos preventivos, lo que da como resultado la mejora de la seguridad y vida útil de puentes, edificios y carreteras al integrar algoritmos de aprendizaje automático que procesan esos datos y guían decisiones de ingeniería.

Modelado BIM y digitalización

El modelado de información de construcción (BIM) se ha consolidado como una práctica estándar en grandes proyectos, pues permite crear modelos digitales tridimensionales ricos en datos (geometría, costos, cronograma) que vinculan todas las fases de diseño, construcción y operación al aprovecharse de simulaciones BIM para prever el consumo energético, calcular requerimientos materiales y coordinar equipos multidisciplinarios. Según Sivasuriyan (2024), países con infraestructura avanzada (EE. UU., Japón y Alemania) emplean BIM junto con herramientas digitales (simulación, realidad virtual) y materiales avanzados para mejorar la eficiencia de proyectos. En la obra, BIM reduce errores de diseño, retrabajos y costos, al tiempo que acelera plazos gracias a la detección temprana de interferencias. La tendencia actual es integrar BIM con impresión 3D y robótica, creando flujos de trabajo automatizados, por ejemplo, un modelo BIM podría usarse directamente para controlar una impresora 3D *in situ*.

3.3. Aplicación de las tecnologías emergentes en ingeniería civil

Además de los avances en materiales innovadores y automatización abordados previamente, la ingeniería civil contemporánea atraviesa una transformación radical gracias a la adopción de tecnologías emergentes que reconfiguran el diseño, la construcción y la gestión de infraestructuras. Herramientas como los gemelos digitales, el IoT, la realidad aumentada y virtual (RA/RV), los drones, la manufactura aditiva (impresión 3D) y los sensores inteligentes se han consolidado como elementos vitales para impulsar una “construcción inteligente” orientada a la eficiencia, la sostenibilidad y la resiliencia (Iranshahi *et al.*, 2025; Tu *et al.*, 2023). Estas tecnologías permiten optimizar recursos y reducir errores, así como generar entornos colaborativos más dinámicos y mejorar la capacidad de adaptación frente a los desafíos ambientales y sociales actuales.

Durante la fase de diseño, herramientas como el modelado nD (3D geométrico, 4D cronograma, 5D costos, 6D sostenibilidad, etc.) y los gemelos digitales han evolucionado más allá del BIM tradicional; esto permite representar digitalmente las infraestructuras junto con sus variables físicas y operativas en tiempo real, integración que facilita la simulación de escenarios, la evaluación energética y la toma de decisiones basada en datos durante todo el ciclo de vida del proyecto (Opoku *et al.*, 2021). Asimismo, tecnologías inmersivas como la realidad aumentada y virtual se han incorporado tanto en la planificación como en la formación técnica, mejorando así la visualización, comprensión de interferencias constructivas y seguridad en obra (Venegas-Loor y Moreira-Aguayo, 2021).

En la fase constructiva, el uso de drones y sensores distribuidos permite llevar a cabo levantamientos topográficos más precisos y monitorear en tiempo real variables clave, como temperatura, vibración, humedad o deformación estructural, reduciendo la necesidad de inspecciones manuales y mejorando la toma de decisiones inmediatas (Cecilio *et al.*, 2020). Por su parte, la impresión 3D de concreto ha demostrado ser eficiente en la construcción de viviendas modulares y elementos estructurales complejos, con menor consumo de mate-

riales y tiempos de obra más cortos (Tu *et al.*, 2023). Se debe tener en cuenta que las obras civiles tienden cada vez más a adoptar esquemas de prefabricación digital combinados con plataformas de trabajo colaborativo basadas en la nube, donde arquitectos e ingenieros intervienen sobre modelos virtuales integrados.

En la fase de operación y mantenimiento, las tecnologías emergentes se han posicionado como herramientas fundamentales para desarrollar estrategias de mantenimiento predictivo. El despliegue de sensores IoT en puentes, túneles o edificaciones permite recopilar datos en tiempo real sobre el estado estructural y ambiental de las infraestructuras, los cuales alimentan modelos dinámicos, como los gemelos digitales, que ayudan a anticipar fallos y planificar intervenciones correctivas o de refuerzo estructural con anticipación, prolongando así la vida útil de los activos y reduciendo costos operativos (Opoku *et al.*, 2021).

Sin embargo, el verdadero potencial de estas tecnologías no solo radica en su capacidad para recolectar o visualizar información, sino en la posibilidad de procesarla y aprender de ella. Aquí es donde cobran especial importancia el análisis masivo de datos (*big data*) y la IA; por ejemplo, los datos captados por sensores o drones deben ser filtrados, clasificados e interpretados para generar información útil; de igual manera, los modelos predictivos que anticipan deterioros estructurales o proponen mejoras de diseño requieren algoritmos inteligentes capaces de aprender de patrones históricos y adaptar sus estimaciones. De esta manera, tanto la *big data* como la IA se posicionan como componentes estratégicos dentro del ecosistema tecnológico que está redefiniendo la ingeniería civil.

En este marco, los próximos apartados examinarán estas dos tecnologías. El punto 3.3.1 abordará la influencia de la IA en la ingeniería civil, explorando cómo los algoritmos de aprendizaje automático están transformando procesos de diseño, simulación, control y mantenimiento; seguidamente, en el punto 3.3.2 se analizará la importancia del *big data* en la construcción, considerando cómo la gestión eficiente de grandes volúmenes de información mejora la toma de decisiones, optimiza los recursos y anticipa riesgos.

3.3.1. Influencia de la inteligencia artificial en ingeniería civil

Existe una influencia creciente de la IA en la ingeniería civil y el sector de la construcción, pero también enfrenta numerosos retos como sobrecostos, retrasos, problemas de seguridad y escasez de mano de obra, además de ser uno de los menos digitalizados. La IA, con sus subcampos como aprendizaje automático, sistemas basados en conocimiento, visión por computadora, robótica y optimización, ofrece nuevas oportunidades para mejorar la productividad, seguridad y eficiencia en la ingeniería civil, pero su adopción aún se ve limitada por diversos desafíos (Abioye *et al.*, 2021).

La Tabla 6 resume las principales aplicaciones de los subcampos de la IA en diversos ámbitos de la ingeniería civil y construcción:

Tabla 6. *Áreas de aplicación de la IA*

Subcampo de IA	Aplicación en ingeniería civil y construcción
Aprendizaje automático	Esta tecnología se utiliza para estimar costos con mayor precisión, optimizar la planificación de proyectos, prever riesgos asociados a la seguridad y salud laboral, y mejorar el monitoreo de condiciones en obra, contribuyendo así a una gestión más eficiente y segura.
Visión por computadora	Permite la automatización del monitoreo <i>in situ</i> mediante análisis de imágenes, facilitando la evaluación del progreso y desempeño, así como la gestión y control de materiales y equipos, aumentando la eficiencia y reduciendo errores humanos.
Robótica	La robótica es implementada en actividades como el montaje fuera de sitio y la automatización en obra, además de la gestión de equipos y materiales, lo que reduce la dependencia de mano de obra tradicional y mejora la precisión en las tareas repetitivas o peligrosas.
Sistemas basados en conocimiento	Mediante este medio, se aplican reglas y datos previos para apoyar la evaluación de licitaciones, resolver conflictos contractuales, gestionar riesgos y evaluar la sostenibilidad de proyectos, lo cual facilita la toma de decisiones informada en procesos complejos.
Procesamiento del lenguaje natural	El procesamiento del lenguaje natural automatiza la gestión documental y el análisis de contratos, facilitando la extracción de información clave, mejorando la coordinación entre partes y contribuyendo a la gestión eficaz del conocimiento en proyectos complejos y multidisciplinarios.
Optimización	Gracias a la optimización se mejora la planificación detallada de proyectos y se optimiza la logística y la cadena de suministro ayudando así a minimizar costos y tiempos, así como a gestionar recursos de manera más efectiva durante todo el ciclo de vida de la construcción.

Nota. Adaptado de Abioye *et al.* (2021)

La IA ha transformado la planificación y ejecución de obras civiles al permitir la optimización de recursos, la automatización de procesos y la mejora en la toma de decisiones. Tecnologías complementarias como el aprendizaje automático, los sistemas basados en el conocimiento y la visión por computadora han demostrado incrementar la eficiencia, reducir costos y plazos, y fortalecer la seguridad en los proyectos de construcción; por ejemplo, el uso de drones equipados con IA posibilita la supervisión en tiempo real de los sitios de obra, y ayuda a detectar riesgos laborales y minimizar desperdicios, lo que contribuye a la sostenibilidad del sector. Como sostienen Montesdeoca *et al.* (2025), dichos avances están siendo adoptados en diversas regiones, como China, que se ha convertido en líder en la implementación de algoritmos inteligentes y *big data* para potenciar la resiliencia de las infraestructuras, mientras que en el contexto latinoamericano países como México están utilizando la IA para optimizar procesos administrativos relacionados con la supervisión de obras.

No obstante, a pesar de los beneficios evidentes, la industria de la construcción enfrenta importantes desafíos para la integración plena de la IA. La ausencia de datos estructurados, la falta de interoperabilidad entre sistemas y la carencia de normas claras para su aplicación dificultan su adopción masiva; además, existen preocupaciones éticas y laborales vinculadas a la automatización, así como barreras económicas, especialmente para las pequeñas y medianas empresas (Montesdeoca *et al.*, 2025). Por ello, se hace indispensable continuar con estudios empíricos que validen la eficacia de la IA en distintos contextos y que promuevan el desarrollo de regulaciones y estándares que faciliten su uso responsable y eficiente. A pesar de tales retos, la tendencia mundial apunta hacia una integración más amplia de la IA, que permitirá elevar la seguridad, la sostenibilidad y la calidad en la ingeniería civil.

3.3.2. *Big data* y su importancia en las construcciones

El *big data* ha emergido como una tecnología transformadora que está revolucionando múltiples sectores industriales, entre ellos, la construcción y la ingeniería civil. Se caracteriza por su capacidad para procesar y analizar grandes volúmenes de datos que, por su magnitud, complejidad y variabilidad, no

pueden ser gestionados mediante métodos convencionales. En este contexto, el *big data* ofrece oportunidades sin precedentes para optimizar procesos, mejorar la toma de decisiones y desarrollar infraestructuras más sostenibles, seguras y eficientes.

La implementación de esta herramienta permite a los profesionales del sector recopilar, almacenar y analizar información valiosa desde las etapas iniciales de los proyectos hasta su mantenimiento a largo plazo, mejorando notablemente la planificación, el diseño y la gestión de infraestructuras. Ahora bien, con relación a las aplicaciones del *big data* en construcción e ingeniería civil, Li (2023) argumenta algunas áreas de interés donde se puede aplicar esta clase de tecnología:

Tabla 7. *Áreas de aplicación del big data*

Área de aplicación	Beneficios
Productividad y eficiencia	Los sensores y dispositivos en maquinaria y sitio de construcción recopilan datos para analizar uso, eficiencia y tiempos de inactividad, por lo que aquí el <i>big data</i> permite la optimización del uso de equipos y condiciones de trabajo.
Mitigación de riesgos	El uso de <i>big data</i> ha logrado mejoras en temas de seguridad laboral. Mediante el análisis de datos de incidentes pasados, condiciones del entorno y comportamiento humano, es posible identificar factores de riesgo y grupos vulnerables, lo que permite actualizar protocolos de seguridad y prevención con base en evidencia empírica, reduciendo accidentes y mejorando la salud ocupacional en las obras.
Reducción de desperdicios	Otra de las funcionalidades sería la reducción de desperdicios materiales y trabajo correctivo mediante análisis de datos para mejorar suministro y uso de materiales. También ayuda en la planificación para disminuir residuos y emisiones de CO ₂ .
Mejora de condiciones laborales	También es posible el monitoreo de salud y factores ambientales del trabajador con sensores biométricos en <i>wearables</i> que mejoran la seguridad y bienestar laboral.
Análisis predictivo de estructuras	En la ingeniería civil, el análisis del rendimiento estructural mediante <i>big data</i> permite evaluar de forma más precisa la integridad de infraestructuras como puentes, túneles o edificios. El uso de técnicas de <i>machine learning</i> puede predecir fallas o deterioros con anticipación basándose en datos como cargas estructurales, condiciones ambientales, historial de reparaciones y más, lo que permite planificar mantenimientos preventivos, extender la vida útil de las infraestructuras y evitar costosos fallos inesperados.

Planificación urbana inteligente	En el ámbito urbano, el <i>big data</i> se utiliza para identificar áreas homogéneas en función de variables como el uso del suelo, la cobertura de servicios públicos o la densidad poblacional ayudando así a tomar decisiones más precisas sobre ampliaciones urbanas, inversión en servicios básicos y localización de futuras zonas de expansión de manera sostenible.
Sostenibilidad ambiental	Permite predecir de manera precisa el material y energía necesarios para promover el uso de materiales más ecológicos y métodos constructivos que reducen el impacto ambiental.
Diseño optimizado de infraestructuras	Mediante el análisis de datos históricos de proyectos anteriores y modelos de simulación, los ingenieros pueden diseñar infraestructuras más eficientes y sostenibles. Los algoritmos de optimización permiten considerar múltiples variables simultáneamente, mejorando la calidad del diseño y reduciendo errores en la ejecución.
Análisis y toma de decisiones	Gracias al análisis y toma de decisiones se puede delimitar la integración de datos estructurados y no estructurados (sensoriales, documentos, redes sociales) para extraer conocimiento, prever problemas, y optimizar procesos mediante IA y aprendizaje automático.

Nota. Tomado de Li (2023)

Ahora bien, a pesar de sus ventajas, la implementación del *big data* enfrenta importantes desafíos; por un lado, las limitaciones tecnológicas, como la falta de infraestructura computacional adecuada, pueden dificultar el análisis de grandes volúmenes de datos —la adopción de sistemas paralelos y distribuidos puede ser una solución, aunque su implementación suele requerir altos costos—; por otro lado, existe una brecha educativa, ya que en muchos países latinoamericanos, como Chile o Perú, la formación universitaria en ingeniería y construcción aún no incorpora de manera formal el uso del *big data* (Vidal-Silva *et al.*, 2019).

3.4. Economía circular: uso de los residuos de construcción

La economía circular aplicada al uso de residuos de construcción consiste en transformar los desechos generados en la industria de la construcción en recursos valiosos que pueden ser reincorporados al ciclo productivo, con el objetivo de minimizar la generación de residuos y maximizar la eficiencia en el uso de materiales (Almeida-Guzmán y Díaz-Guevara, 2020).

El enfoque principal es retener los materiales durante el mayor tiempo posible en el ciclo de vida de la edificación, y una de las bases para lograrlo es considerar los residuos como recursos potenciales para nuevos procesos, además de ver los residuos como indicadores de pérdida de productividad que requieren un cambio de mentalidad dentro de la industria (CDTCCC, 2020). Para fomentar esta transición, es crucial el desarrollo de tecnologías y proyectos de innovación relacionados con la construcción industrializada y con materiales reciclados, por ejemplo, el uso de áridos reciclados, enfatizando la colaboración con la academia para impulsar nuevos modelos de negocio basados en conocimiento.

Ejemplos prácticos incluyen iniciativas de reciclaje de poliestireno expandido (EPS), que transforman este residuo contaminante en pinturas y recubrimientos, cerrando el ciclo de vida de materiales y disminuyendo emisiones de CO₂. Entonces, la economía circular busca un sistema restaurativo y regenerativo donde los productos y procesos se diseñan para que los materiales mantengan el máximo valor posible prolongando su vida útil y facilitando su reutilización o reciclaje, reduciendo al mínimo la generación de residuos no aprovechables.

A continuación, se explican algunos puntos a considerar a la hora de estudiar cómo es que la economía circular influye en el uso de los residuos de construcción según un estudio realizado por Purchase *et al.* (2022):

Figura 4. *Principales aspectos y desafíos de la economía circular en la gestión de residuos de construcción*



Nota. Tomado de Purchase *et al.* (2022)

Con relación al primer punto, los autores sostienen que la implementación de la economía circular en la gestión de residuos de construcción y demolición enfrenta múltiples desafíos que se agrupan en cinco categorías principales: legales, técnicos, sociales, conductuales y económicos, en los cuales se encuentran barreras como la falta de normativas claras o incentivos legales que

promuevan la reutilización, limitaciones tecnológicas para procesar residuos de calidad adecuada, desconocimiento o percepciones negativas dentro del sector, así como los costos iniciales elevados asociados a tecnologías de recuperación y reciclaje. Además, la variabilidad en el tamaño de los proyectos y diferencias regionales hacen que no exista un único marco universal, lo que exige el desarrollo de estrategias adaptadas que faciliten una transición efectiva desde un modelo lineal hacia uno circular en diferentes contextos.

Ahora bien, para que la economía circular sea efectiva en la construcción, los materiales reciclados deben cumplir con estándares de calidad que garanticen su desempeño técnico y durabilidad, por lo que la investigación científica debe enfocarse en analizar la composición química, propiedades físicas y mecánicas, así como la resistencia y longevidad de estos materiales para asegurar que su reutilización no comprometa la seguridad ni funcionalidad de las estructuras. Cumplir con estas especificaciones facilita la aceptación por parte de contratistas y reguladores, y mejora la viabilidad económica de los procesos de reciclaje, convirtiendo los residuos en insumos valiosos para nuevos ciclos constructivos.

Como tercer punto, hay que repensar aplicando el enfoque 3R: reducir, reutilizar y reciclar. Reducir implica minimizar la generación de desperdicios desde el diseño y planificación; reutilizar fomenta la recuperación directa de materiales o componentes sin alteraciones significativas; y reciclar abarca la transformación de residuos en nuevos materiales útiles, por lo que este enfoque integral permitirá conservar recursos naturales, disminuir la demanda de materias primas vírgenes y reducir la presión sobre vertederos, contribuyendo así a un sistema constructivo más sostenible y eficiente.

Por último, con relación al análisis del ciclo de vida, para evaluar plenamente los beneficios ambientales de adoptar la economía circular en la gestión de residuos de construcción, es indispensable realizar análisis de ciclo de vida. Esta herramienta permite cuantificar impactos como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, ahorro energético y conservación de recursos naturales a lo largo de todo el proceso, desde la generación y gestión de residuos hasta la reincorporación de materiales reciclados. Estudios que aplican el

ciclo de vida demuestran que, aunque el reciclaje consume energía, los beneficios sociales y ambientales superan ampliamente los costos, haciendo que la economía circular sea un modelo ambientalmente viable para la industria de la construcción.

3.4.1. Gestión y tratamiento de residuos de construcción

El sector de la construcción se caracteriza por un elevado consumo de materias primas y una significativa generación de residuos, lo que genera un impacto ambiental considerable, por lo que la implementación de estrategias de economía circular, como la reutilización de productos de construcción provenientes de edificios al final de su vida útil, se presenta como una vía para reducir la extracción de recursos y minimizar la generación de residuos (Bellini *et al.*, 2024). Además, la reutilización contribuye a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y el consumo energético asociado a la producción de materiales nuevos, fortaleciendo así la sostenibilidad en el sector.

Sin embargo, la gestión eficaz de estos residuos requiere un enfoque sistémico que involucre la evaluación *in situ* durante la fase de desmantelamiento para determinar la viabilidad técnica y económica de la reutilización de elementos constructivos. Esto demanda conocimientos especializados y una coordinación interdisciplinaria, así como una adecuada gestión y digitalización de la información para asegurar la trazabilidad y calidad de los materiales reutilizados. Así, la correcta gestión y tratamiento de residuos de construcción puede favorecer una transición hacia ciclos de materiales más cerrados y eficientes, alineados con los principios de la economía circular.

Seguí *et al.* (2018) clasifican los residuos generados por actividad económica y destacan el sector de la construcción como un gran generador de residuos, junto con minería y cantera, por lo que la gestión adecuada de estos residuos implica adoptar tratamientos y modelos que permitan minimizar su impacto ambiental y aprovechar al máximo los materiales, alineándose con los principios de la economía circular.

En cuanto a los tratamientos, Seguí *et al.* (2018) afirman que se utilizan diferentes métodos para la gestión de residuos, entre ellos:

- **Eliminación.** Incluye cualquier operación que no sea valorización, incluso si hay aprovechamiento secundario de energía o sustancias.
- **Incineración sin recuperación de energía.** Reducción térmica del volumen y riesgo de residuos.
- **Valorización energética.** Transformación de residuos en formas de energía mediante aprovechamiento del contenido calórico.

Para los residuos de construcción, específicamente, la valorización puede incluir la recuperación y reciclaje de materiales como el hormigón, ladrillos y metales; así se reduce la necesidad de materias primas vírgenes y disminuye el impacto ambiental.

En suma, la gestión y tratamiento de residuos de construcción debe tomar en cuenta las mejores prácticas para su recolección, transporte, valorización (reciclaje, reutilización) y eliminación para cumplir con la directiva europea 2008/98/CE sobre residuos, que define la gestión integral, incluyendo vigilancia y mantenimiento posteriores, asegurando la calidad del proceso.

CAPÍTULO IV

TECNOLOGÍAS EMERGENTES EN INGENIERÍA CIVIL Y LA ECONOMÍA CIRCULAR: UNA REVISIÓN DE ALCANCE

La acción de satisfacer la demanda mundial de nuevas edificaciones para responder al crecimiento poblacional y al aumento del nivel de vida se contrapone a la necesidad urgente de enfrentar el calentamiento global y la pérdida de biodiversidad (*Pettorelli et al.*, 2021). Para superar este doble desafío, resulta indispensable avanzar hacia una economía circular (EC) mediante el uso generalizado de materiales de construcción alternativos con bajas emisiones de carbono, así como tecnologías y prácticas sostenibles (*Morel et al.*, 2021).

La EC en el sector de la construcción se presenta como uno de los enfoques más prometedores, al buscar preservar el valor de los materiales y las estructuras durante el mayor tiempo posible (*Hossain et al.*, 2020). La industria de la construcción está experimentando un crecimiento acelerado debido a la demanda global, con un aumento sostenido en el número de proyectos a escala internacional. Los principios de la EC abarcan aspectos relevantes como la reutilización de materiales, la optimización de la cadena de suministro y la incorporación de tecnologías ecológicas innovadoras (*Garusinghe et al.*, 2023). En consecuencia, este enfoque tiene un alto potencial para reducir tanto las emisiones de carbono como el volumen total de residuos generados por la industria (*Bherwani et al.*, 2022).

Sin embargo, la implementación de la EC en el sector se ve obstaculizada por la complejidad de sus estrategias y la naturaleza particular de la industria de la construcción (*Charef et al.*, 2021). En este contexto, las tecnologías digitales (TD) se han explorado como soluciones prometedoras para apoyar la toma de decisiones y facilitar estrategias circulares en los sectores de arquitectura, ingeniería y construcción (*Banihashemi et al.*, 2024).

Dentro de este marco, la inteligencia artificial (IA) ha comenzado a desempeñar un papel crucial, al ofrecer herramientas disruptivas y beneficiosas.

Esta tecnología proporciona a los ingenieros civiles diversas oportunidades, tales como una recopilación de datos más eficiente, evaluación sostenible y mejora de la productividad (*Manzoor et al.*, 2024). Este potencial se refleja especialmente en tecnologías como la *blockchain* (TBC) y los pasaportes de materiales, que han demostrado ser prometedoras para impulsar estrategias de EC en el sector de la construcción (*Bulkowska et al.*, 2023). No obstante, su aplicación a lo largo del ciclo de vida de los edificios aún es limitada, y la adopción de TBC sigue siendo incipiente (*Khalid et al.*, 2025).

A ello se suma el modelado de información de construcción (BIM), que ha sido clave en la mayoría de las integraciones tecnológicas. Sin embargo, es necesario profundizar en investigaciones que permitan comprender el impacto de estas integraciones en el desarrollo de políticas, estándares y métodos de evaluación asociados a la EC (*Charef y Emmitt*, 2021). Desde una perspectiva crítica, se requiere promover investigaciones colaborativas que permitan identificar los riesgos asociados a la digitalización en el entorno construido, especialmente aquellos relacionados con la privacidad y la ciberseguridad (*Ismagilova et al.*, 2020).

El avance de la transformación industrial en el siglo XXI ha favorecido el desarrollo de diversas tecnologías digitales en los ámbitos de arquitectura, ingeniería, construcción y operación (AECO), entre las cuales continúa destacando el BIM. De manera paralela, la EC se ha consolidado como una estrategia clave para abordar problemáticas socioambientales como la generación de residuos, el agotamiento de recursos y el cambio climático (*Ferriz-Papi et al.*, 2024). No obstante, las limitaciones en la implementación tanto de BIM como de EC han derivado en diversos desafíos socioeconómicos que persisten pese a los esfuerzos realizados por distintos sectores (*AlJaber et al.*, 2023).

En un plano más específico, la convergencia entre BIM y EC ha dado origen a un enfoque emergente denominado *CircularBIM*, basado en el aprendizaje automático (AA) y en técnicas de filtrado colaborativo, ya sea basado en contenido o mediante una combinación de ambos (*Amudjie et al.*, 2025). Esta nueva propuesta tecnológica posee el potencial de optimizar el diseño de estructuras con alta circularidad, por lo que se proyecta como una tecnología emergente con aplicaciones significativas en la edificación.

Dado lo expuesto, el presente estudio tiene como propósito integrar los aspectos conceptuales y aplicativos de las tecnologías emergentes y la economía circular en la ingeniería civil, a través de la revisión de literatura. Por ello se establece como punto de partida la formulación y manejo de la siguiente interrogante: ¿cuáles son los aspectos conceptuales y aplicativos de las tecnologías emergentes y la economía circular en la ingeniería civil?

4.1. Metodología

El estudio se desarrolló dentro de los lineamientos de una revisión integradora de la literatura, por ser un vehículo útil para avanzar en el conocimiento y promover la investigación en un dominio temático (Olivera *et al.*, 2020). Para ello, se recurrió a un proceso de localización de documentos en las siguientes bases de datos digitales disponibles en la red: Scopus, SciELO y Google Scholar. De igual manera, se establecieron ecuaciones de búsqueda con operadores booleanos, combinando palabras claves, asociadas directamente con las categorías y constructos propios de la temática (MacFarlane *et al.*, 2022). En tal sentido, se consideraron “Economía Circular”, Ingeniería Civil”, “Sector Construcción” y “Tecnologías emergentes” “Circular Economy”, “Civil Engineering”, “Construction Sector” and “Emerging Technologies” como puntos de partida. De igual manera, se establecieron criterios de elegibilidad seccionados en lineamientos de inclusión y exclusión, según el alcance del estudio (Salmasi *et al.*, 2022). En la Tabla 8, se señalan los criterios establecidos.

Tabla 8. *Criterios de inclusión y exclusión*

Criterios	
Inclusión	Exclusión
Publicaciones en el período 2020-2021	Documentos publicados antes de 2020
Documentos académicos en inglés o español	Documentos académicos en idiomas distinto al inglés o español Documentos no académicos
Se observe un resumen conformado por Introducción, objetivo del estudio, metodología, resultados, discusión, conclusiones y palabras claves	Sin resumen o resumen incompleto

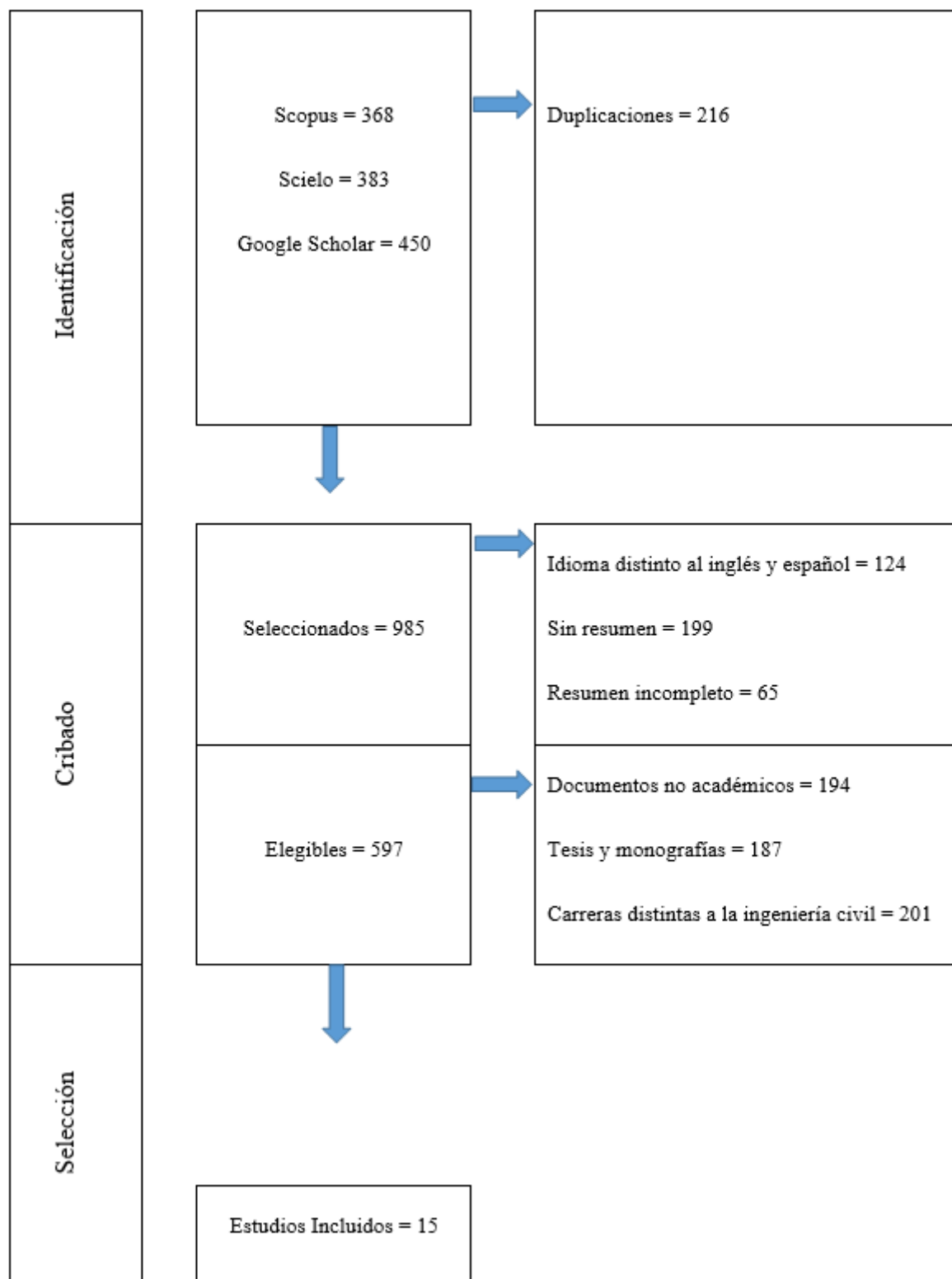
Artículos de revisión, artículos de investigación, capítulos de libro, publicaciones en conferencias.	Tesis de titulación, postgrado o monografías
Temáticas con la interacción entre Economía Circular y Tecnologías Emergentes	Temáticas distintas a los constructos asociados con Economía Circular y Tecnologías Emergentes
Temática relacionada directamente con la ingeniería civil o sector construcción	Carreras distintas a ingeniería civil o sector construcción

Nota. Elaboración propia

Para ordenar el proceso de búsqueda, se ajustaron los procedimientos a los lineamientos establecidos en el protocolo Prisma (*Barquero, 2022*), el cual especifica el flujo metodológico desarrollado para las fases de identificación, cribado (selección y elegibilidad) e inclusión de documentos. Durante la fase de identificación, se recopilaron 1201 documentos: 368 en la base de datos Scopus, 383 en SciELO y 450 en Google Scholar. En esta primera etapa, se detectaron 216 duplicados, los cuales fueron eliminados, quedando un total de 985 registros únicos.

En la etapa de selección, se aplicaron los primeros criterios de exclusión: 124 documentos fueron descartados por estar redactados en un idioma distinto al inglés o al español; 199 no contenían resumen; y 65 presentaban resúmenes incompletos. Para la fase de elegibilidad, se excluyeron 194 documentos por no ser de carácter académico, 187 correspondían a tesis o monografías, y 201 estaban relacionados con disciplinas ajenas a la ingeniería civil. Finalmente, se incluyeron 15 artículos para su análisis en profundidad. La Figura 5 describe de manera detallada el proceso metodológico aplicado.

Figura 5. Diagrama de flujo metodológico, según el protocolo Prisma



Nota. Elaboración propia

4.2. Resultados y discusión

En cuanto a la presentación de los resultados, los hallazgos se organizaron en la Tabla 9, la cual se divide en tres grupos específicos. El primer grupo está conformado por los artículos que abordan exclusivamente la economía circular. El segundo reúne los documentos centrados en las tecnologías emergentes en el ámbito de la ingeniería civil. El tercer grupo incluye aquellas publicaciones que relacionan, de forma directa o indirecta, la economía circular con las tecnologías emergentes en dicho campo disciplinar.

Tabla 9. *Hallazgos principales detectados en la revisión sistemática*

Autore(s)/ (año)	Objetivo	Temática	Metodología	Revista/base de datos	Hallazgo
González <i>et al.</i> (2021)	Describir la experiencia e implementación del modelo de EC en la industria del hormigón y su efecto económico-ambiental en la aplicación de hormigón reciclado en Ecuador	Economía Circular	Revisión de literatura	<i>Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas/</i> Scielo	De manera estratégica en áreas rurales de Ecuador, por ejemplo, los proyectos futuros de construcción de carreteras pueden implementarse mediante enfoques circulares que incorporen concreto reciclado proveniente de fuentes locales. Así, esta iniciativa muestra una considerable viabilidad, tanto económica como tecnológica.

Monroy <i>et al.</i> (2022)	Analizar la alternatividad sostenible, sobre la utilización de la celulosa vegetal como materia prima para mitigar el impacto ambiental y su uso en diferentes productos para la construcción	Economía Circular	Revisión de literatura	<i>TECHNO REVIEW. Revista Internacional de Tecnología, Ciencia y Sociedad/Google Scholar</i>	Gracias a este material, es posible erigir estructuras en un plazo de 24 horas y puede contribuir a la creación de viviendas de alta necesidad. Esto fomenta su uso entre los investigadores para sus iniciativas, con el fin de ofrecer una contribución significativa a los objetivos de sostenibilidad en cualquier región del planeta.
Zavala <i>et al.</i> (2024)	Exploran los avances en la adopción de materiales y tecnologías de bajo impacto ambiental en el sector de la construcción.	Economía circular.	Revisión crítica	<i>Revista Alcance/Scielo</i>	El movimiento hacia la utilización de biopolímeros compuestos por fibra natural en una matriz polimérica demuestra una perspectiva creativa en la elección de materiales que pretenden minimizar el impacto ambiental de las iniciativas en la ingeniería civil.
Marsh <i>et al.</i> (2022)	Explorar las estrategias de Economía Circular (EEC) para el hormigón: implementación e integración	Economía Circular	Revisión narrativa	<i>Journal of Cleaner Production/Scopus</i>	Los aspectos sociales y políticos son inseparables de los aspectos técnicos y ambientales. Si la sociedad se toma en serio la búsqueda de una EC, es inevitable cuestionar el papel de los paradigmas político-económicos y culturales dominantes.

Yu <i>et al.</i> (2023)	Explorar las herramientas de apoyo a la toma de decisiones basadas en las TIC que facilitan la implementación de la EC en la construcción	Economía circular	Revisión sistemática de la literatura	<i>Journal of Cleaner Production/Scopus</i>	Existe un enfoque global para formar una cadena de suministro de circuito cerrado mediante la integración de los principios de las 3R en modelos de negocio circulares que vinculen proyectos de construcción y demolición. Así, se pueden desarrollar estrategias de coordinación para los mercados de materiales secundarios e innovar en soluciones basadas en las TIC para potenciar la colaboración público-privada y mejorar la eficacia y eficiencia de la formulación de políticas de EC para el entorno construido. También, permite analizar el comportamiento del usuario y los factores sociales desde una perspectiva multidisciplinar para impulsar el desarrollo de las TIC.
-------------------------	---	-------------------	---------------------------------------	---	--

Norouzi <i>et al.</i> (2021)	Analizar de forma cuantitativa la evolución científica de la aplicación de la EC en el sector de la construcción.	Economía Circular	Revisión sistemática y metaanálisis	<i>Journal of Building Engineering/Scopus</i>	Se destaca que (i) el desarrollo y uso de materiales de construcción alternativos; (ii) el desarrollo de modelos de negocios circulares; (iii) las ciudades inteligentes, la Industria 4.0 y sus relaciones con la EC, son los puntos críticos de investigación actuales que pueden considerarse como posibles temas de investigación futuros.
Baque-Campozano <i>et al.</i> (2023)	Explorar los conceptos fundamentales del hormigón autorreparable, que involucra la incorporación de materiales especiales en la mezcla de hormigón.	Tecnologías emergentes	Revisión de literatura	<i>Revista Científica Ingeniar: Ingeniería, Tecnología e Investigación/Google Scholar</i>	En los últimos años, se ha planteado la cuestión de utilizar dos modelos de predicción de los problemas en el hormigón posconstrucción como herramientas de las tecnologías emergentes. Las Redes Neuronales Artificiales (ANN, por sus siglas en inglés) y el Sistema de Inferencia Neurodifusa Adaptativa (ANFIS, por sus siglas en inglés), forman parte de dichas herramientas.

Carvajal-Rivadeneira (2024)	Evaluar el impacto de la IA en proyectos de infraestructura, identificando sus aplicaciones principales, beneficios y barreras.	Tecnologías Emergentes	Enfoque mixto. Revisión Sistemática de la literatura, análisis de casos y simulaciones.	<i>Revista Científica Ingeniar: Ingeniería, Tecnología e Investigación/Google Scholar</i>	La IA supera los métodos tradicionales en cuanto a la generación de eficiencia operativa, con lo cual se logra un mejor abordaje del impacto ambiental.
Jaimés-Quintanilla <i>et al.</i> (2024)	Establecer los niveles de apropiación de tecnologías emergentes, principalmente inteligencia artificial, en la gestión de proyectos del sector de la construcción	Tecnologías emergentes	Enfoque mixto. Revisión de literatura internacional y el modelo de determinación de madurez tecnológica	<i>European Public & Social Innovation Review/Scopus</i>	Los resultados muestran alto interés del sector productivo y de la comunidad académica en el uso de la IA en la gestión de proyectos, priorizando áreas como costos, calidad, tiempos, alcance y riesgos. Se da gran prioridad a la incorporación de software con IA, LLM (Large Language Models) y procesamiento de grandes datos.

Choi <i>et al.</i> (2023)	Analizar la aplicación de los Drones en la industria de la construcción	Tecnologías Emergentes	Revisión de literatura	<i>Drones/Scopus</i>	Los Drones, como vehículos aéreos no tripulados, manejados por medio de la IA, poseen capacidad para volar y evitar obstáculos de manera autónoma. En la etapa de diseño, estos llevan cámaras de alta definición y funciones avanzadas para crear mapas han transformado la investigación de terrenos y la elaboración de mapas desde el aire. Durante la fase de edificación, han sido fundamentales en la supervisión del avance de la construcción, realizando chequeos y asegurando la seguridad. En el período de mantenimiento de las obras, llevan a cabo inspecciones periódicas de estructuras, edificios y otras infraestructuras. Estos drones son capaces de detectar y reconocer rápidamente cualquier tipo de daño, lo que facilita un mantenimiento anticipado, disminución de gastos y aumento de la vida útil de los recursos
---------------------------	---	------------------------	------------------------	----------------------	--

Thirumal <i>et al.</i> (2024)	Identificar las barreras para la adopción de TD e implementar prácticas de EC en la industria de la construcción.	Economía circular y las Tecnologías Emergentes.	Revisión sistemática de la literatura de veintiocho (28) artículos relevantes publicados hasta marzo de 2024 en las bases de datos Scopus y Web of Science	<i>Sustainability/Scopus</i>	Se identificaron treinta y siete (37) barreras para el uso de las TD para implementar la EC, categorizadas en nueve áreas: organizacionales, de infraestructura, regulatorias, de estandarización, de inversión, de la naturaleza del sector de la construcción, tecnológicas, de las partes interesadas y relacionadas con los datos. De estas, diecinueve se identificaron como críticas según el análisis de Pareto. Estos hallazgos beneficiarán a los profesionales de la construcción y a los responsables políticos que deseen adoptar las TD para integrar prácticas de EC en el sector.
----------------------------------	---	---	--	------------------------------	--

Behún y Behúnová (2023)	Identificar el potencial del procesamiento y uso de materia prima no energética (áridos reciclados) en la industria de la construcción y proponer un concepto para el modelado de información de los parámetros de la construcción sostenible utilizando esta materia prima no energética según los principios de la economía circular.	Economía circular y las Tecnologías Emergentes.	Enfoque mixto. Análisis teórico y empírico en la construcción de un nuevo edificio sostenible.	<i>Applied Sciences/</i> Scopus	La base de datos permite de la biblioteca BIM, definir las propiedades prioritarias de los productos con elementos de materias primas recicladas mediante diversos parámetros, siguiendo los objetivos de la economía circular. Al crear un concepto para el uso de esta información integrada sobre los productos en cuestión, se identifica una intersección común entre las dimensiones individuales del modelado de información que contienen información sobre costes, sostenibilidad y gestión de las construcciones (edificios) durante su ciclo de vida. De este modo, fue posible conectar el concepto de uso de las tecnologías de la información modernas para aumentar el potencial del uso de materias primas recicladas no energéticas y materiales para apoyar la economía circular y el desarrollo sostenible
----------------------------	---	---	--	------------------------------------	---

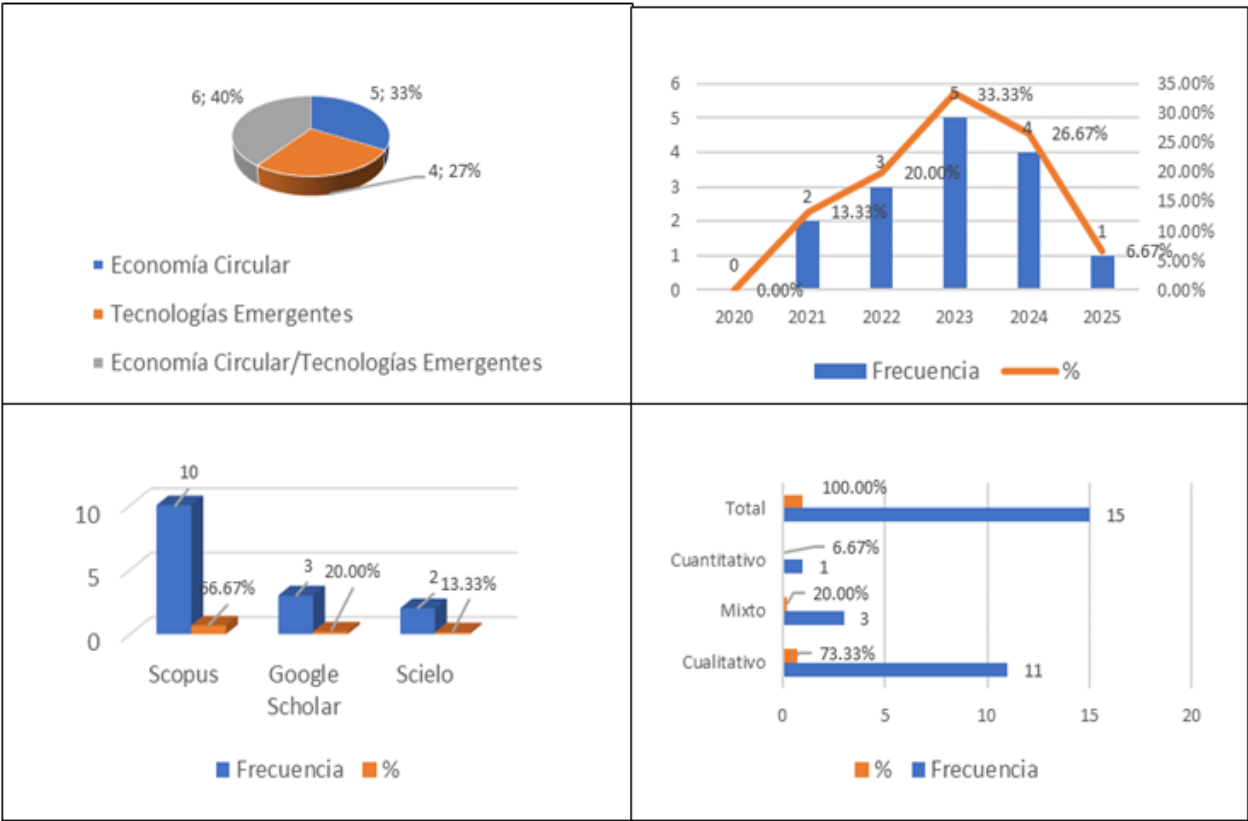
Mendoza-Rangel <i>et al.</i> (2023).	Exponer aspectos generales de EC en la industria latinoamericana del cemento y concreto, así como un análisis de alternativas tecnológicas y su aplicabilidad.	Economía Circular y Tecnologías emergentes	Revisión de literatura	<i>Revista Alconpat/Scopus</i>	En el caso de los materiales avanzados, estos agregan propiedades superiores al concreto convencional, mejorando las propiedades mecánicas y de durabilidad por medio de diferentes mecanismos físicos y químicos, contribuyendo a su eficiencia y sostenibilidad en el contexto de la EC.
Keles <i>et al.</i> (2025).	Identificar las tecnologías emergentes digitales clave para facilitar la circularidad en el sector de la construcción.	Economía Circular y Tecnologías Emergentes	Revisión Sistemática de la literatura	<i>Buildings/Scopus</i>	Se detectaron diez (10) tecnologías innovadoras digitales que promueven la circularidad en la industria de la construcción. Estas incluyen: tecnología basada en BIM, recolección de datos geoespaciales, inteligencia artificial y aprendizaje automático, Internet de las Cosas, <i>blockchain</i> y gemelos digitales. Las otras abarcan desde realidad aumentada y virtual, plataformas y mercados digitales, pasaportes para materiales, hasta fabricación aditiva y digital.
Shojaei <i>et al.</i> (2022)	Analizar la <i>blockchain</i> como una tecnología prometedora para facilitar la EC en el entorno construido.	Tecnología Emergente y la Economía Circular	Enfoque cuantitativo. Estudio empírico, caso práctico.	<i>Journal of Cleaner Production/Scopus</i>	La <i>blockchain</i> puede proporcionar una trazabilidad completa de los materiales y la energía, lo que permite al usuario realizar predicciones para el reciclaje y la reutilización de materiales y bienes utilizados en el entorno construido.

Nota. Elaboración propia

De la información recolectada y analizada se desprende que, entre los 15 artículos seleccionados para el análisis en profundidad, el 33.33 % ($n = 5$) aborda de forma exclusiva la temática de la economía circular; el 26.67 % ($n = 4$) se enfoca en las tecnologías emergentes aplicadas a la ingeniería civil; y el 40 % ($n = 6$) trata la integración de ambas áreas dentro del campo de la ingeniería civil o el sector de la construcción. Este panorama evidencia un interés creciente por vincular la sostenibilidad con la innovación tecnológica en el desarrollo de soluciones constructivas más eficientes. Al analizar la distribución de las publicaciones por año, se observa que en 2020 no se registraron documentos relacionados con el objeto del estudio. En 2021 se publicaron dos artículos, cifra que aumentó a tres en 2022. El año 2023 concentró el mayor número de publicaciones con cinco artículos, seguido de 2024 con cuatro. No obstante, en 2025 se detecta una disminución considerable, con solo una publicación vinculada a esta línea de investigación.

Respecto a la indexación o procedencia digital de las publicaciones analizadas, el 66.67 % ($n = 10$) pertenece a la base de datos Scopus, lo que da cuenta de una alta concentración de estudios en revistas con visibilidad y rigurosidad científica reconocida. Un 20 % ($n = 3$) se encuentra disponible en Google Scholar, mientras que el 13.33 % restante ($n = 2$) corresponde a la base de datos SciELO. En cuanto a las metodologías empleadas, se identificó que la mayoría de los estudios (73.33 %, $n = 11$) adoptaron un enfoque cualitativo, fundamentalmente a través de revisiones de literatura. Por su parte, el 20 % ($n = 3$) corresponde a investigaciones empíricas de enfoque mixto, mientras que solo un estudio (6.67 %, $n = 1$) se desarrolló bajo una metodología puramente cuantitativa. La Figura 6 presenta una representación gráfica de los aspectos cuantitativos que destacan en los resultados obtenidos.

Figura 6. Composición gráfica de los aspectos cuantitativos del estudio



Nota. Elaboración propia

Sobre la economía circular y la ingeniería civil

Frente a las crecientes exigencias de sostenibilidad, el sector de la construcción se encuentra en un momento crucial en el que la aplicación de tácticas de economía circular (EC) resulta fundamental para impulsar una transformación que permita mitigar el impacto ambiental. Para respaldar esta transición, la ingeniería civil ha incorporado de manera efectiva principios circulares en el diseño de edificaciones. A la luz del avance de las investigaciones, evidenciado en diversas publicaciones académicas, resulta esencial trazar la evolución de esta línea de estudio con el fin de comprender su desarrollo y proyecciones futuras.

Desde esta perspectiva, González *et al.* (2021) destacan que, en el contexto de la construcción en Ecuador, la reutilización de concreto reciclado ofrece condiciones que se alinean con los fundamentos de la EC. Por su parte, Monroy *et al.* (2022) subrayan que la incorporación de celulosa vegetal en los materiales de construcción representa una alternativa no contaminante,

reciclable, renovable y de bajo costo industrial. En otro enfoque, Zavala *et al.* (2024) abordan el estudio de hidrogeles a base de colágeno combinados con hidroxiapatita, utilizados en la ingeniería de tejidos, lo cual pone de relieve la importancia de desarrollar materiales biocompatibles. A su vez, Marsh *et al.* (2022) enfatizan que los sistemas de valores políticos y sociales constituyen la base de los marcos legales y económicos en los que se desarrollan los modelos de negocio de la construcción y sus materiales, lo cual incide directamente en la viabilidad de prácticas sostenibles.

En cuanto a las herramientas de apoyo, Yu *et al.* (2023) destacan el papel de la gestión de datos compatibles y la integración tecnológica, especialmente mediante el uso de Building Information Modeling (BIM) como centro de información unificada. En este sentido, se articula la recopilación de datos con el diseño arquitectónico general, a través de sistemas integrados de soporte a la toma de decisiones. Complementariamente, Norouzi *et al.* (2021) observaron una creciente atención hacia la sostenibilidad, la eficiencia energética, el análisis del ciclo de vida, el aprovechamiento de energías renovables y el reciclaje en los últimos cinco años. Estos hallazgos se alinean con los aportes de Garusinghe *et al.* (2023), Morel *et al.* (2021) y Bherwani *et al.* (2022), quienes coinciden en destacar la reutilización de materiales de construcción mediante tecnologías y prácticas alternativas.

Desde las tecnologías emergentes y la construcción civil

La necesidad de implementar tecnologías de construcción emergentes y ecológicas se ve reforzada por el aumento acelerado en las exigencias de sostenibilidad impuestas a las organizaciones, así como por la obligación de las empresas constructoras de compartir datos vinculados a su desempeño ambiental. En este escenario, la competitividad en el sector depende tanto de la comprensión de la relevancia de la sostenibilidad como de la valorización de los beneficios que conlleva la integración de tecnologías constructivas respetuosas con el entorno.

En concordancia con lo anterior, Baque-Camposano *et al.* (2023) señalan que, dentro del marco de las tecnologías emergentes, la incorporación de bacterias

en la formulación del hormigón convencional genera mejoras sustanciales en la resistencia a la compresión y potencia la propiedad de autocuración del material. Desde el ámbito digital, Carvajal-Rivadeneira (2024) destaca que la inteligencia artificial (IA) contribuye significativamente a reducir costos y emisiones de residuos, al tiempo que optimiza la gestión de recursos, los tiempos de ejecución y la precisión en los procesos constructivos.

En la misma dirección, Jaimes-Quintanilla *et al.* (2024) afirman que se ha priorizado la incorporación de software con IA, modelos de lenguaje de gran escala (LLM) y herramientas para el procesamiento de grandes volúmenes de datos. Estas tecnologías permiten agilizar el manejo efectivo de la información y tomar decisiones con mayor rapidez y menor margen de error. Por su parte, Choi *et al.* (2023) combinaron la IA con inspecciones autónomas mediante drones, capaces de detectar y reconocer daños estructurales de forma temprana, lo que facilita el mantenimiento preventivo, reduce costos y prolonga la vida útil de los recursos. En consonancia, Banihashemi *et al.* (2024) y Manzoor *et al.* (2024) subrayan que la IA, como parte de las tecnologías digitales emergentes, impulsa un incremento notable en la productividad de las distintas etapas del proceso constructivo y mejora la calidad de la toma de decisiones.

Tecnologías emergentes y la economía circular en ingeniería civil

La adopción de la EC en el sector construcción requiere una consideración equilibrada de cuatro dimensiones: ambiental, social, económica y técnica, siendo esta última clave para viabilizar el desarrollo de soluciones circulares. En este marco, las tecnologías emergentes desempeñan un rol determinante. Al respecto, Thirumal *et al.* (2024) identifican una serie de barreras que obstaculizan la implementación de tecnologías digitales en el ámbito de la ingeniería civil, entre ellas el alto consumo energético potencial de algunas de estas herramientas. Desde otra perspectiva, Behún y Behúnová (2023) aportan al debate al destacar el procesamiento de materias primas no energéticas y la disponibilidad de información sobre productos elaborados a partir de materiales reciclados, los cuales pueden integrarse en la base de datos de la biblioteca BIM y ser utilizados durante la fase de preparación del proyecto.

En cuanto a las innovaciones tecnológicas, Mendoza-Rangel *et al.* (2023) observaron que la adopción de impresión 3D, el uso de materiales avanzados —como fibras de refuerzo, nanomateriales y aditivos especiales— y la prefabricación de elementos constructivos optimizan el uso de recursos y favorecen la implementación y sostenibilidad de la EC en el sector construcción. Asimismo, Keles *et al.* (2025) señalaron que entre las tecnologías emergentes con mayor potencial para facilitar estrategias circulares se encuentran la *blockchain* y los pasaportes de materiales, aunque su aplicación en el sector sigue siendo limitada. En paralelo, el uso del BIM se mantiene como una herramienta esencial para integrar estas tecnologías, aunque es necesario profundizar en estudios que evalúen cómo dichas integraciones contribuyen al desarrollo de políticas, estándares y métodos de evaluación alineados con los principios de la economía circular.

En esa misma línea, Shojaei *et al.* (2022) sostienen que esta tecnología posibilita la trazabilidad de los materiales utilizados, el tipo de energía empleada y su consumo, lo cual la convierte en un enfoque viable e innovador para aplicar los principios de la EC en la construcción. De manera emergente, se ha identificado la convergencia entre tecnologías digitales, principios circulares y procesos constructivos, como lo evidencian Ferriz-Papi *et al.* (2024), AlJaber *et al.* (2023) y Amudjie *et al.* (2025). Estos investigadores destacan la articulación entre BIM y EC a través del modelo conceptual CircularBIM, que se presenta como una propuesta con alto potencial para mejorar la circularidad económica en el diseño de edificaciones.

4.3. Conclusiones

A través de la revisión de la literatura se precisaron aspectos conceptuales y aplicativos de las tecnologías emergentes y la economía circular en la ingeniería civil como el agregado de materiales especiales al hormigón, la TD y la IA. Desde una perspectiva reflexiva, se precisaron una serie de barreras potenciales que pueden afectar la implementación de tecnologías emergentes y la EC en la ingeniería civil. Entre las principales se encuentran los altos costos

de implementación, la falta de compromiso de las partes interesadas, el manejo y la falta de estandarización de los procesos. De igual forma, el mantenimiento para el uso de las herramientas tecnológicas, la falta de mano de obra capacitada y los sistemas actuales de gestión de la información pueden jugar un papel determinante. Por consiguiente, se requieren nuevas investigaciones sobre las barreras de seguridad, la circularidad en la etapa de diseño y el nivel de calidad de las tecnologías para materiales reutilizables, reciclables y recuperables.

CAPÍTULO V

AVANCES ACTUALES EN LA INGENIERÍA CIVIL

La ingeniería civil ha iniciado un proceso de transformación orientado a conciliar el desarrollo de infraestructuras con la preservación del medioambiente y el uso eficiente de los recursos. Ante el agotamiento progresivo de materiales naturales, el endurecimiento de las normativas ambientales y los efectos evidentes del cambio climático, el sector se enfrenta a una reconfiguración profunda. En este contexto, el presente capítulo aborda los avances que están dando forma a una nueva manera de concebir, diseñar y ejecutar obras civiles, donde la innovación tecnológica y los principios de sostenibilidad se integran como pilares fundamentales. Desde esta perspectiva, la ingeniería civil deja de estar enfocada únicamente en resolver problemáticas estructurales o funcionales, para asumir un rol más amplio: el de contribuir activamente a la construcción de un futuro más resiliente, eficiente y equitativo.

Se ofrece, en primer lugar, una introducción al concepto de ingeniería verde, desarrollada desde un enfoque integral que promueve soluciones con bajo impacto ambiental en todas las etapas del ciclo de vida de un proyecto. En este marco, se analizan diversas estrategias clave, como la utilización de materiales reciclados, el diseño pasivo de edificaciones, la incorporación de energías renovables, la gestión hídrica sostenible y el uso de herramientas digitales como Building Information Modeling (BIM). Estas prácticas no solo buscan mitigar los efectos ambientales negativos, sino que también aportan beneficios económicos y sociales al reducir el consumo energético, aumentar la eficiencia operativa y fomentar entornos urbanos más saludables y habitables.

A continuación, se presenta un bosquejo de las tecnologías emergentes que están transformando la industria de la construcción. Entre estas destacan la inteligencia artificial, la impresión 3D, los drones, los materiales autorreparables y los sistemas avanzados de eficiencia energética. El análisis se centra en su aplicación concreta en obras civiles, sus ventajas y los desafíos asociados a

su implementación. Estas tecnologías están redefiniendo los procesos constructivos mediante la automatización y digitalización, lo que permite una mayor precisión en la ejecución, una reducción de costos operativos y mejoras significativas en términos de sostenibilidad y trazabilidad de los materiales.

Por último, se explora el vínculo entre la economía circular y la innovación en el sector de la construcción, destacando cómo este enfoque propone cerrar el ciclo de vida de los materiales mediante su reutilización, reciclaje y rediseño. Además, se subraya la relevancia de las innovaciones organizativas y sociales, tales como los modelos de negocio circulares, la prefabricación de elementos constructivos y la necesidad de una capacitación técnica adecuada para los actores del sector. Estas dinámicas, en conjunto, consolidan un enfoque más responsable y adaptativo frente a los desafíos ambientales, económicos y sociales del siglo XXI.

5.1. Ingeniería verde para la sostenibilidad ambiental

La ingeniería verde en el contexto de la construcción se define como un enfoque multidisciplinario y holístico que busca minimizar los impactos ambientales de las actividades humanas. Se prioriza la sostenibilidad, la equidad y la eficiencia en el ciclo de vida completo de edificaciones e infraestructuras, desde la planificación y diseño hasta la operación y disposición final (Wang y Baniotopoulos, 2023).

En particular, la construcción verde se orienta a seleccionar materiales y sistemas amigables con el medio ambiente, ya que distribuye racionalmente el personal y los recursos con el fin de reducir al máximo el desperdicio de insumos y energía reconociendo que la ingeniería civil desempeña un papel fundamental en la configuración del entorno construido y en la promoción del desarrollo sostenible (Zavala *et al.*, 2024). Por ello, las prácticas de ingeniería civil contemporáneas exploran activamente la adopción de tecnologías de bajo impacto (por ejemplo, materiales alternativos) y diseños que mejoren la eficiencia energética y la gestión de recursos.

La aplicación de la ingeniería verde implica adoptar parámetros y principios que permitan abordar los retos ambientales actuales. Tal como señala

Gesto (2024), la ingeniería verde promueve la conservación de recursos y la reducción de daños al clima y la biodiversidad y es que, específicamente, la incorporación de prácticas sostenibles facilita la mitigación de problemas asociados al cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la escasez de recursos naturales. Por ejemplo, el empleo de criterios de diseño pasivo y eficiencia energética en las edificaciones, así como el desarrollo de tecnologías limpias y soluciones inspiradas en la economía circular. En una revisión reciente, se destaca la integración de energías renovables (solar, eólica, etc.) y la gestión de recursos y residuos bajo una óptica circular como tendencias clave en la construcción sostenible (Zavala *et al.*, 2024).

En la práctica, la ingeniería verde en construcción se materializa mediante diversas estrategias y tecnologías innovadoras. Entre las más relevantes cabe mencionar:

- **Materiales sostenibles y reciclados.** Por ejemplo, reemplazar agregados vírgenes en el hormigón con áridos reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición. Esto reduce la dependencia de recursos naturales y la huella de carbono asociada a la extracción de áridos. Estudios recientes muestran que el uso de agregados reciclados en el concreto disminuye el consumo energético y las emisiones de CO₂ al reutilizar materiales locales (Alibeigibeni *et al.*, 2025).
- **BIM.** Por ejemplo, la adopción de BIM facilita la simulación y optimización del rendimiento energético de los edificios ya que es posible generar sistemas muy eficientes y ajustar diferentes escenarios de diseño, lo cual reduce el desperdicio energético y los impactos ambientales del proyecto. Como se aprecia, con el uso del BIM ha demostrado “tener la gran oportunidad de disminuir significativamente los efectos negativos en el medio ambiente” a través de la simulación del comportamiento energético de las edificaciones (Waqar *et al.*, 2023).
- **Infraestructura verde y gestión hídrica.** Tecnologías inspiradas en la naturaleza como los techos verdes o jardines en azoteas ofrecen múltiples beneficios ambientales. Por ejemplo, los techos verdes mejoran el aislamiento térmico, retienen agua de lluvia y atenúan el efecto isla de

calor urbano. Para lograr una cubierta verde sostenible es clave seleccionar sustratos adecuados y plantas tolerantes a la sequía, así como sistemas de riego basados en fuentes alternas (como aguas lluvias o grises), soluciones verdes contribuyen a reducir la demanda hídrica potable y a aprovechar recursos naturales in situ, alineándose con los principios de la ingeniería verde (Shahmohammad *et al.*, 2022).

- **Energías renovables y diseño pasivo.** Por ejemplo, incluir fuentes de energía limpias (paneles solares fotovoltaicos, turbinación eólica, etc.) en los proyectos constructivos incrementa la sostenibilidad; de igual forma, el diseño arquitectónico pasivo (orientación solar, ventilación natural, envolventes aislantes) disminuye el consumo energético de las edificaciones (Zavala *et al.*, 2024). En conjunto, estas prácticas apoyan el equilibrio ecológico al reducir la demanda de energía y emisiones directas, en línea con la economía circular y la eficiencia global del proyecto.

La sinergia de estas estrategias promueve construcciones más sostenibles. En concreto, integrar agregados reciclados en el hormigón y ampliar el uso de tecnologías BIM puede mitigar el impacto ambiental de las obras mientras se mejoran sus propiedades mecánicas y de durabilidad (Alibeigibeni *et al.*, 2025; Waqar *et al.*, 2023), aunque varios autores advierten que existen desafíos para generalizar estas prácticas incluyendo barreras económicas, regulatorias y de capacitación técnica (Gesto, 2024; Zavala *et al.*, 2024); en efecto, estudios recientes concluyen que, aunque hay innovaciones prometedoras, se requiere un esfuerzo sostenido en políticas, normativas y formación para incorporar plenamente la sostenibilidad en la ingeniería civil.

5.2. Las tecnologías emergentes en la industria constructora

Las nuevas tecnologías digitales están transformando de manera exponencial la construcción al integrar herramientas como el BIM, impresión 3D, IA, IoT y drones para mejorar la eficiencia, precisión y sostenibilidad de los proyectos. Por ejemplo, antes de iniciar una obra, algoritmos de IA pueden optimizar licitaciones; durante la ejecución, robots con IA y escáneres de realidad aumentada inspeccionan avances y actualizan modelos BIM en tiempo

real, mientras equipos de impresión 3D aplican hormigón especializado capa a capa; por lo tanto, estas innovaciones ofrecen a los constructores información detallada del estado de cada fase del proyecto, reduciendo tiempos y costos.

A continuación, se compara cada tecnología en función de su uso, beneficios y retos:

Tabla 10. *Resumen de tecnologías emergentes*

Aplicación	Ventajas	Desafíos/limitaciones
BIM modelado 3D de información		
Gestión integrada del diseño, planificación y mantenimiento de obras	Mayor precisión en diseño y planificación; coordinación colaborativa entre disciplinas; reducción de errores y retrabajos	Inversión inicial elevada en <i>software</i> e infraestructuras; curva de aprendizaje y resistencia al cambio organizacional Problemas de interoperabilidad y falta de estándares claros.
Impresión 3D		
Construcción aditiva de elementos o estructuras (casas, muros, moldes) capa por capa con mortero/concreto u otros materiales	Reducción drástica de tiempos constructivos (hasta 70 %)	Coste muy alto del equipo especializado; pocos proveedores y falta de personal capacitado Limitaciones en el material imprimible (viscosidad, tiempo de fraguado) Ausencia de normativas específicas
Inteligencia artificial		
Optimización de diseño, planificación y logística; análisis predictivo (mantenimiento, seguridad, costos)	Automatiza tareas rutinarias y predice riesgos, aumentando la productividad.	Necesita gran volumen de datos y alta inversión en <i>software</i> y capacitación Resistencia cultural en el sector tradicional; preocupaciones por pérdida de empleo Dependencia de expertos en IA y sus algoritmos

Drones		
Vigilancia y topografía aérea de obras; inspección de estructuras inaccesibles; monitoreo del avance y seguridad en obra	Acceso rápido a áreas de difícil o peligroso acceso sin arriesgar vidas. Registra imágenes y datos en alta resolución para detectar errores o deficiencias estructurales. Reduce tiempos de levantamientos topográficos y mejora la precisión del monitoreo de obra.	Coste operativo y de mantenimiento elevado Autonomía limitada de vuelo (baterías) y restricciones de carga. Necesita operadores cualificados Regulaciones aéreas estrictas y protocolos de seguridad en cada zona
Materiales autorreparables		
Materiales (concreto, polímeros, metales con memoria de forma) que sellan grietas o deformaciones internamente mediante microcápsulas, cambios de fase o estímulos externos	Alarga la vida útil de las estructuras al sellar fisuras automáticamente, reduciendo necesidades de reparación	Tecnología incipiente y compleja Coste de fabricación alto; procesos aún experimentales Número limitado de ciclos de autocuración (agotan los agentes reparadores) Integración con materiales convencionales aún en estudio
Eficiencia energética		
Tecnologías pasivas y activas (aislamiento avanzado, climatización eficiente, iluminación LED inteligente, energías renovables) para reducir el consumo energético de edificios	Ahorro significativo en consumo eléctrico y costos operativos	Inversión inicial elevada (equipos y obras de reforma) Avances tecnológicos obligan a actualizaciones frecuentes Eficacia condicionada al correcto uso por parte de los usuarios y clima local

Nota. Elaboración propia

Estas tecnologías emergentes reconfiguran la construcción tradicional y ofrecen un nivel de detalle y automatización sin precedentes reduciendo así tiempos y costos en las obras. Además, al prolongar la vida útil de las infraestructuras (por ejemplo, con materiales autorreparables) y optimizar los

recursos energéticos, contribuyen a edificaciones más sostenibles; sin embargo, su adopción exige superar barreras financieras y organizativas (capacitación, normativa y estandarización). En el futuro próximo, se espera una mayor convergencia digital: los modelos BIM avanzarán hacia gemelos digitales en tiempo real y las obras incorporarán sistemas autónomos interconectados (robótica, IA e IoT) que permitan gestionar proyectos de forma integrada y eficiente. El reto será impulsar una inversión inteligente y formación continua para aprovechar plenamente estos avances y dirigir al sector hacia construcciones más seguras, ecológicas y resilientes.

5.3. Economía circular e innovación en la construcción

La construcción es uno de los sectores más desafiados por su alto consumo de recursos y generación de residuos. La economía circular, entendida como un modelo de producción y consumo que promueve la reutilización, reciclaje y prolongación del ciclo de vida de los materiales, presenta una oportunidad transformadora para esta industria y es que la integración de principios circulares, junto con innovaciones tecnológicas y organizativas, puede revolucionar la eficiencia, sostenibilidad y competitividad del sector.

La innovación impulsa la economía circular en la construcción por lo que aplicar criterios de circularidad —como la durabilidad, adaptabilidad, y capacidad de desensamblaje de materiales— en etapas tempranas de diseño permite maximizar la reutilización y minimizar la generación de residuos. Entonces, hay que tener en cuenta que las herramientas tecnológicas como el BIM facilitan la planificación integral y la colaboración interdisciplinaria para optimizar el uso de materiales y prever su fin de vida (Corporación de Desarrollo Tecnológico de la Cámara Chilena de la Construcción, 2020).

Por otro lado, la industrialización y prefabricación de componentes constructivos constituyen innovaciones clave que aumentan la eficiencia, generación de productos de alta calidad y disminución de desperdicios en obra. Ejemplos claros son la incorporación de nuevas tecnologías, como la impresión 3D con materiales reciclados —que abre nuevas posibilidades para aprovechar residuos y reducir impactos ambientales— y la robotización y sensores inteli-

gentes para monitoreo estructural —que, de igual forma, contribuyen a la durabilidad y el mantenimiento predictivo optimizando la vida útil de las edificaciones—.

Los modelos de negocio circulares constituyen una innovación determinante, ya que la transición hacia servicios basados en la reutilización, el alquiler o el mantenimiento continuo de materiales y productos constructivos potencia la economía circular y promueve un sistema productivo más resiliente y competitivo. Desde una perspectiva organizativa, la colaboración a lo largo de toda la cadena de valor, junto con procesos integrados y digitalizados, resulta esencial para superar las barreras culturales, institucionales y regulatorias que dificultan la adopción generalizada de prácticas circulares. Esta transformación exige un cambio sistémico que involucre tanto a los actores del sector como a los marcos normativos que rigen su funcionamiento.

En este sentido, es necesario reconocer que la innovación no se limita al ámbito tecnológico, sino que también abarca dimensiones sociales y de gestión. La capacitación continua, la sensibilización y la generación de conocimiento específico sobre economía circular dentro de la industria de la construcción son componentes clave para fortalecer una cultura orientada hacia la sostenibilidad. Esta perspectiva facilita una adopción más amplia y eficaz de prácticas innovadoras, al tiempo que empodera a los profesionales del sector para afrontar los desafíos de un entorno en constante evolución. Asimismo, el impulso de políticas públicas y estrategias nacionales, tales como hojas de ruta sectoriales y normativas específicas, desempeña un papel fundamental como catalizador de esta transición.

La innovación, por tanto, también debe entenderse como un fenómeno cultural y educativo. La formación técnica especializada y la difusión de experiencias exitosas en la aplicación de modelos circulares son aspectos cruciales para derribar resistencias al cambio y consolidar una cultura organizacional comprometida con la sostenibilidad (Venegas-Loor y Moreira-Aguayo, 2021). En paralelo, la gobernanza y la formulación de políticas públicas eficaces deben crear ecosistemas propicios para incentivar la adopción de tecnologías circulares y fomentar la inversión en investigación y desarrollo. Esto incluye el

diseño de incentivos, programas de financiamiento y mecanismos de articulación interinstitucional que aceleren la innovación en todos los niveles del sector.

En suma, la sinergia entre economía circular e innovación —ya sea tecnológica, organizativa o social— traza una hoja de ruta sólida para transformar el sector de la construcción hacia un modelo más sostenible, eficiente y competitivo. Esta transformación requiere un compromiso firme que abarque todas las etapas del ciclo de vida de los proyectos, desde el diseño preliminar hasta la operación y eventual desmantelamiento. Al promover un ciclo virtuoso de materiales y recursos, no solo se genera valor económico, sino que también se contribuye a la protección ambiental y al bienestar social, consolidando así una visión integral del desarrollo sostenible en la ingeniería civil contemporánea.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abioye, S., Oyedele, L., Akanbi, L., Ajayi, A., Davila Delgado, J., Bilal, M., Akinade, O. y Ahmed, A. (2021). Artificial intelligence in the construction industry: a review of present status, opportunities and future challenges. *Journal of Building Engineering*, 44, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103299>

Adamari, C., Mayta Tanta, L., Del Carpio, E., Vera, B. y Flores, A. (2023). Comportamiento del concreto autocompactante con el avance tecnológico en la aplicación de nuevos materiales y su influencia en el comportamiento en sus propiedades físico-mecánicas – una revisión. *Salud, Ciencia y Tecnología - Serie de Conferencias*, 2, 1-15. <https://doi.org/10.56294/sctconf2023535>

Al Mawlani, N. y Al Mubarak, M. (2024). Construction 4.0 technologies: uses and challenges. *Developments in Corporate Governance and Responsibility*, 23, 69-90. <https://dx.doi.org/10.1108/S2043-052320240000023004>

Alibeigibeni, A., Stochino, F., Zucca, M. y López, F. (2025). Enhancing concrete sustainability: a critical review of the performance of recycled concrete aggregates (RCAs) in structural concrete. *Buildings*, 15(8), 1-25. <http://doi.org/10.3390/buildings15081361>

AlJaber, A., Alasmari, E., Martinez-Vazquez, P. y Baniotopoulos, C. (2023). Life Cycle Cost in Circular Economy of Buildings by Applying Building Information Modeling (BIM): A State of the Art. *Buildings*, 13(7), 1858. <https://doi.org/10.3390/buildings13071858>

Almeida-Guzmán, M. y Díaz-Guevara, C. (2020). Economía circular, una estrategia para el desarrollo sostenible. Avances en Ecuador. *Estudios de la Gestión. Revista Internacional de Administración*, 8, 34-56. <https://doi.org/10.32719/25506641.2020.8.10>

Amaro, M. y Robles, E. (2020). Medir la innovación en el contexto de las tecnologías emergentes y convergentes algunas reflexiones metodológicas. *Paakat: Revista de Tecnología y Sociedad*, 10(18), 1-22. <https://dx.doi.org/10.32870/Pk.a10n18.415>

Amudjie, J., Chan, A., Darko, A., Debrah, C. y Agyekum, K. (2025). Circular-BIM: Future needs at the convergence of building information modelling and the circular economy. *Automation in Construction*, 176(106250), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106250>

Antonelli, M. y Della, G. (2022). *Civil and environmental engineering for the sustainable development goals emerging issues*. Springer. <https://link.springer.com/bookseries/11159>

Banco de Desarrollo de América Latina. (2018). Economía circular e innovación tecnológica en residuos sólidos: oportunidades en América Latina. En *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11, Número 1). Corporación Andina de Fomento. <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/1247>

Banihashemi, S., Meskin, S., Sheikhhoshkar, M., Reza Mohandes, S., Hajirasouli, A. y LeNguyen, K. (2024). Circular economy in construction: The digital transformation perspective. *Cleaner Engineering and Technology*, 18(100715), 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100715>

Baque-Campozano, B., Pino-Tarragó, J y Delgado-Mendoza, K. (2023). Estructuras sostenibles y hormigón autorreparable. *Revista Científica "INGENIAR": Ingeniería, Tecnología e Investigación*, 6(12), 1-7. <https://doi.org/10.46296/ig.v6i12edespoct.0120>

Baquero, W. (2022). Análisis PRISMA como metodología para revisión sistemática: una aproximación general. *Revista Saúde em Redes*, 8(Supl1), 339-360. <https://doi.org/10.18310/2446-4813.2022v8nsup1p339-360>

Behún, M. y Behúnová, A. (2023). Advanced Innovation Technology of BIM in a Circular Economy. *Applied Sciences*, 13(13), 1-14. <https://doi.org/10.3390/app13137989>

Bellini, A., Andersen, B., Klungseth, N. y Tadayon, A. (2024). Achieving a circular economy through the effective reuse of construction products: a case study of a residential building. *Journal of Cleaner Production*, 450, 1-15. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141753>

Bherwani, H., Nair, M., Niwalkar, A., Balachandran, D. y Kumar, R. (2022). Application of circular economy framework for reducing the impacts of climate change: A case study from India on the evaluation of carbon and materials footprint nexus. *Energy Nexus*, 5(100047), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100047>

Bułkowska, K., Zielińska, M. y Bułkowski, M. (2023). Implementation of Blockchain Technology in Waste Management. *Energies*, 16(23), 7742. <https://doi.org/10.3390/en16237742>

Carrillo, G. y Pomar, S. (2021). La economía circular en los nuevos modelos de negocio. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, 9(23), 1-16. <http://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2021.23.79933>

Carvajal-Rivadeneira, D., Guaranda-Mero, D., Domínguez-Gálvez, D., Regalado-Jala y J. (2024). Aplicación de la inteligencia artificial en proyectos de ingeniería civil, *Revista Científica “INGENIAR”: Ingeniería, Tecnología e Investigación*, 7(14), 390-404. <https://doi.org/10.46296/ig.v7i14.0223>

Castro, D., García, J., Cevallos, A., Mera, D. y Murillo, C. (2024). Economía circular como estrategia para la competitividad empresarial. *Ciencia y Desarrollo. Universidad Alas Peruanas*, 27(4), 563-577. <https://revistas.uap.edu.pe/ojs/index.php/CYD/article/view/2762/2757>

Cecilio, A., Fernandes, M., Fernandes, M. y Orrú, A. (2020). Innovación desde las tecnologías emergentes. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, 5(10), 54-71. <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/wp-content/uploads/2020/12/Innovaciones-tecnologicas.pdf>

Charef, R. y Emmitt, S. (2021). Uses of building information modelling for overcoming barriers to a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 285(124854), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124854>

Charef, R., Morel, J.-C., y Rakhshan, K. (2021). Barriers to Implementing the Circular Economy in the Construction Industry: A Critical Review. *Sustainability*, 13(23), 12989. <https://doi.org/10.3390/su132312989>

Choi, H.-W., Kim, H.-J., Kim, S.-K. y Na, W. S. (2023). An Overview of Drone Applications in the Construction Industry. *Drones*, 7(8), 515. <https://doi.org/10.3390/drones7080515>

Clemente, A. y Debs, L. (2023). Identifying emerging technologies and skills required for construction 4.0. *Buildings*, 13(10), 1-24. <https://doi.org/10.3390/buildings13102535>

Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2022). *Economía circular en América Latina y el Caribe. Oportunidad para una recuperación transformadora*.

Consejo de Asesores sobre Ciencia y Tecnología. (2024, abril). Supercharging research: harnessing artificial intelligence to meet global challenges [presentación de PCAST]. Oficina del Presidente, Casa Blanca.

Corporación de Desarrollo Tecnológico de la Cámara Chilena de la Construcción. (2020). *Introducción a la economía circular en construcción. Diagnóstico y oportunidades en Chile*. Comité Consultivo Público. <https://construye2025.cl/wp-content/uploads/2022/07/Introduccion-a-la-economia-circular-en-la-construccion-Diagnostico-y-Oportunidades-en-Chile.pdf>

Cotoarba, D., Straub, D. y Smith, I. (2024). *Probabilistic digital twins for geotechnical design and construction*. Arxiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.09432>

Departamento de Redacción de Editorial Protiendas S.L.U. (s. f.). *Nuevas tecnologías en construcción que transformarán la arquitectura*. ProArquitectura. <https://www.proarquitectura.es/nuevas-tecnologias-en-construccion-que-transformaran-la-arquitectura/>

Do Nascimento, D. y De Souza, M. (2020). Barreras y desafíos para el desarrollo de la economía circular: panorama de la producción científica y tecnológica internacional. *Revista Gestión de las Personas y Tecnología*, 39, 93-111. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7836922>

Escuela de Educación Superior Tecnológica. (7 de agosto de 2023). *Importancia y objetivos de las tecnologías emergentes*. <https://www.sise.edu.pe/blog/importancia-objetivos-tecnologias-emergentes>

Ferriz-Papi, J. A., Lee, A. y Alhawamdeh, M. (2024). Examining the Challenges for Circular Economy Implementation in Construction and Demolition Waste Management: A Comprehensive Review Using Systematic Methods. *Buildings*, 14(5), 1237. <https://doi.org/10.3390/buildings14051237>

Firoozi, A., Firoozi, A., Oyejobi, D., Avudaiappan, S. y Saavedra, E. (2024). Emerging trends in sustainable building materials: technological innovations, enhanced performance, and future directions. *Results in Engineering*, 24, 1-37. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103521>

Foro Económico Mundial. (2024, julio 3). *Cómo afectarán al mundo las 10 tecnologías emergentes más importantes de 2024*. <https://es.weforum.org/stories/2024/07/como-afectaran-al-mundo-las-10-tecnologias-emergentes-mas-importantes-de-2024/>

Fundación Conama. (2018). Economía circular en el sector de la construcción. En *Congreso Nacional del Medio Ambiente 2018*. [https://www.conama.org/conama/download/files/conama2018/GTs 2018/6_final.pdf](https://www.conama.org/conama/download/files/conama2018/GTs%202018/6_final.pdf)

Garusinghe, G. D., Perera, B. A. y Weerapperuma, U. S. (2023). Integrating Circular Economy Principles in Modular Construction to Enhance Sustainability. *Sustainability*, 15(15), 11730. <https://doi.org/10.3390/su151511730>

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. y Hultink, E. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>

Gesto, J. (2024). Ingeniería verde. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 24(1). <https://doi.org/10.19053/uptc.1900771X.v24.n1.2024.16859>

Gob.pe. (2025, marzo 24). *10 tecnologías emergentes que están revolucionando el mundo*. <https://www.gob.pe/85416-10-tecnologias-emergentes-que-estan-revolucionando-el-mundo>

Gómez-Valdés, M., Acevedo-Acevedo, S., Alvarado-Acuña, L. y Iturra-Molina, R. (2023). Impact of the BIM methodology in the management of construction projects. *Revista Tecnología en Marcha*, 36, 66-77. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i7.6860>

González, K., Baque, B. y Regalado, J. (2021). Revisión sistemática de la economía circular en la industria del hormigón: Efecto económico ambiental. *Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas*, 14(1), 189-198. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8590401.pdf>

Hao, H., Bi, K., Chen, W., Pham, T. y Li, J. (2023). Towards next generation design of sustainable, durable, multi-hazard resistant, resilient, and smart civil engineering structures. *Engineering Structures*, 277, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115477>

Hossain, M. A., Zhumabekova, A., Paul, S. y Kim, J. (2020). A review of 3D printing in construction and its impact on the labor market. *Sustainability*, 12(20), 1-21. <https://doi.org/10.3390/su12208492>

Hossain, Md. U., Ng, S., Antwa-Afari, O. y Amor, B. (2020). Circular economy and the construction industry: Existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130(109948), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109948>

Hungaro, E., Andrade, R., Levy, W. y De Melo, D. (2021). Circular economy: a brief literature review (2015–2020). *Sustainable Operations and Computers*, 2, 79-86. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.05.001>

- Iranshahi, K., Brun, J., Arnold, T., Sergi, T. y Müller, U. (2025). Digital twins: recent advances and future directions in engineering fields. *Intelligent Systems with Applications*, 26, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2025.200516>
- Ismagilova, E., Hughes, L., Rana, N. P. y Dwivedi, Y. (2022). Security, Privacy and Risks Within Smart Cities: Literature Review and Development of a Smart City Interaction Framework. *Inf Syst Front*, 24, 393–414. <https://doi.org/10.1007/s10796-020-10044-1>
- Jaimes-Quintanilla, M. y Zabala-Vargas, S. (2024). Inteligencia artificial en la gestión de proyectos: caso construcción y obra civil [Artificial intelligence in project management: case of construction and civil works]. *European Public & Social Innovation Review*, 9, 1-21. <https://doi.org/10.31637/epsir-2024-1615>
- Keles, C., Cruz, F. y Hoque, S. (2025). Digital Technologies and Circular Economy in the Construction Sector: A Review of Lifecycle Applications, Integrations, Potential, and Limitations. *Buildings*, 15(553), 1-27. <https://doi.org/10.3390/buildings15040553>
- Khalid, K., Yousif, M., Sumra, A. y Qazi, A. (2025). Blockchain in the Digital Age: Challenges, Opportunities, and Future Trends. *Journal of Computing & Biomedical Informatics*, 8(02). 1-20. <https://doi.org/10.56979/802/2025>
- Kirchherr, J., Reike, D. y Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Kraus, M., Rust, R., Rietschel, M. y Hall, D. (2022). *Improved perception of AEC construction details via immersive teaching in virtual reality*. Arxiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.10617>
- Li, F., Laili, Y., Chen, X., Lou, Y., Wang, C., Yang, H., Gao, X. y Han, H. (2023). Towards *big data* driven construction industry. *Journal of Industrial Information Integration*, 35, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100483>
- Liang, C.-J., Le, T., Ham, Y., Mantha, B., Chenge, M. y Lin, J. (2024). Ethics of artificial intelligence and robotics in the architecture, engineering, and construction industry. *Automation in Construction*, 162, 1-109. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105369>
- MacFarlane, A., Russell-Rose, T. y Shokraneh, F. (2022). Search strategy formulation for systematic reviews: Issues, challenges and opportunities. *Intelligent Systems with Applications*, 15(200091), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2022.200091>

Manzoor, B., Othman, I., Durdyev, S., Ismail, S. y Wahab, M. H. (2021). Influence of Artificial Intelligence in Civil Engineering toward Sustainable Development—A Systematic Literature Review. *Applied System Innovation*, 4(3), 52. <https://doi.org/10.3390/asi4030052>

Marcet, X., Marcet, M. y Vergés, F. (2018). Qué es la economía circular y por qué es importante para el territorio. *Papeles del Pacto Industrial*, 4, 1-56. <https://www.pacteindustrial.org/wp-content/uploads/2018/02/Papel-del-Pacto-Industrial-4-Que-es-la-economia-circular-y-por-que-es-importante-para-el-territorio.pdf>

Marsh, A., Valenturf, A. y Bernal, S. (2022). Circular Economy strategies for concrete: implementation and integration. *Journal of Cleaner Production*, 362(132486), 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132486>

Martínez, A. y Porcelli, A. (2018). Estudio sobre la economía circular como una alternativa sustentable frente al ocaso de la economía tradicional (primera parte). *Lex*, 16(22), 301-334. <https://dx.doi.org/10.21503/lex.v16i22.1659>

Medina, J. y Freire, A. (2023). Barreras para la implementación de la economía circular en países en vías de desarrollo. *Estudios de la Gestión: Revista Internacional de Administración*, 14, 99-121. <https://doi.org/10.32719/25506641.2023.14.6>

Medina-Cárdenas, Y. y Rico-Bautista, D. (2025). *El papel de las tecnologías digitales emergentes en el diseño instruccional : beneficios y desafíos*, 21(1), 1-6. <https://doi.org/10.22463/2011642X.4753>

Melati, K., Nikam, J. y Nguyen, P. (2021). Barriers and drivers for enterprises to transition to circular economy. *Stockholm Environment Institute*, 1-8. <https://doi.org/10.51414/sei2021.029>

Mendoza-Rangel, J. M. y Díaz-Aguilera, J. H. (2023), Economía circular en la industria latinoamericana del cemento y el concreto: una solución sustentable de diseño, durabilidad, materiales y procesos. *Revista ALCONPAT*, 13(3), 328–348, <https://doi.org/10.21041/ra.v13i3.697>

Monroy, J., Díaz, M. y Vera, M. (2022). Productos con celulosa vegetal: una alternativa para la ingeniería civil. *Techno Review. Revista Internacional de Tecnología Ciencia y Sociedad*, 2-8. <https://doi.org/10.37467/revtechno.v11.4435>

Montesdeoca, R., Valdivieso, K., Loor, M., Lino, V. y Carvajal, D. (2025). Aplicación de la inteligencia artificial en planificación de obras civiles: un análisis textual discursivo. *Código Científico Revista de Investigación*, 6, 768-787. <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v6/nE1/717>

Morel, J-D., Charef, R., Hamard, E., Fabbri, A., Beckett, C y Bui Q-B (2021). Earth as construction material in the circular economy context: practitioner perspectives on barriers to overcome. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 376(20200182), 1-9. <https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0182>

Murray, A., Skene, K. y Haynes, K. (2017). The circular economy: an interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. *Journal of Business Ethics*, 140(3), 369-380. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>

Negrón-Ríos, G. (2020). La economía circular. *Colegio de Ciencias Agrícolas*, 1-4. <https://naturalezasintoxicos.wordpress.com/wp-content/uploads/2020/02/cc-economc3ada-circular.pdf>

Norouzi, M., Cháfer, M., Cabeza, L., Jiménez, L. y Boer, D. (2021). Circular economy in the building and construction sector: A scientific evolution analysis. *Journal of Building Engineering*, 44(102704), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102704>

Núñez, B. y Santamaría, R. (2024). El uso de las tecnologías emergentes en la práctica educativa practice. *European Public & Social Innovation Review*, 9, 1-17. <https://doi.org/10.31637/epsir-2024-829>

Oliveira J. A., Spagnol C. A., Camargos A. T., De Matos S. S, Da Silva S. F. y Oliveira J. M. de.(2020). Permanent education in nursing at the intensive care unit. *J Nurs UFPE on line*, 14(e244644), 1-14. <https://doi.org/10.5205/1981-8963.2020.244644>

Opoku, D. G., Perera, S., Osei-Kyei, R. y Rashidi, M. (2021). Digital twin application in the construction industry: a literature review. *Journal of Building Engineering*, 40, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102726>

Pérez, R. (2024). *Retos y desafíos de las tecnologías emergentes conversaciones entre pares*. Libros@Red de Investigadores de la Transcomplejidad.

Pettorelli, N., Graham, N., Seddon, N., Da Cunha Bustamante, M., Lowton, M., Sutherland, W., Koldewey, H., Prentice, H. y Barlow, J. (2021). Time to integrate global climate change and biodiversity science-policy agendas. *Journal of Applied Ecology*, 58(11), 2384-2393. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13985>

Piloto, C. (2023). *Economía circular: beneficios y retos para las empresas e individuos*. MIT Professional Education. <https://professionalprograms.mit.edu/es/blog/sostenibilidad/economia-circular/>

Porcelli, A. y Martínez, A. (2018). Análisis legislativo del paradigma de la economía circular. *Revista Direito GV*, 14(3), 1067-1105. <https://doi.org/10.1590/2317-6172201840>

Purchase, C., Al Zulayq, D., O'Brien, B. T., Kowalewski, M., Berenjian, A., Tarighaleslami, A. y Seifan, M. (2022). Circular economy of construction and demolition waste: a literature review on lessons, challenges, and benefits. *Materials*, 15(1), 1-25. <https://doi.org/10.3390/ma15010076>

Ramos-Rivadeneira, D. y Jiménez-Toledo, J. (2023). La innovación desde las tecnologías emergentes para la competitividad empresarial. *Gestión y Desarrollo Libre*, 9(17), 1-14. <https://doi.org/10.18041/2539-3669/gestionlibre.17.2024.11052>

Reyes, A., Cortés, D., Rosa, L. y Soto, L. (2022). Aplicación de la economía circular en el diseño de una boya para mejorar la accesibilidad en Ciudad Juárez, México. En *26 th International Congress on Project Management and Engineering* (pp. 1290-1299). <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85150378179&origin=inward&txGid=78789c29b749cfbe-0874308d3d9d2957>

Rodríguez, J. (2023). *Beneficios y desventajas de la implementación de Smart Contracts en la industria constructora colombiana* [tesis de maestría, Universidad de Los Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/5ba6ec16-aa51-4ff7-a807-b6b863b99e30/content>

Sales, C., Paulino, M., Conselho, R. y Barreto, R. (2024). Digital twins a digital transformation for management of the construction industry. *Contribuciones a Las Ciencias Sociales*, 17(2), 1-28. <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.2-036>

Salmasi, V., Lii, T., Humphreys, K., Reddy, V. y Mackey, S. (2022). A literature review of the impact of exclusion criteria on generalizability of clinical trial findings to patients with chronic pain. *PAIN Reports*, 7(6), 1-5. <https://doi.org/10.1097/PR9.0000000000001050>

Seguí, L., Medina, R. y Guerrero, H. (2018). *Gestión de residuos y economía circular*. EAE Business School. https://www.diarioabierto.es/wp-content/uploads/2018/09/Gestion_residuos_EAE.pdf

Shahmohammad, M., Hosseinzadeh, M., Dvorak, B., Bordbar, F., Shahmohammadmirab, H. y Aghamohammadi, N. (2022). Sustainable green roofs: a comprehensive review of influential factors. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(52), 78228-78254. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23405-x>

Shojaei, A., Ketabi, R., Razkenari, M., Hakim, H. y Wang, J. (2021). Enabling a circular economy in the built environment sector through blockchain technology. *Journal of Cleaner Production*, 294(126352), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126352>

Sivasuriyan, A., Sivalinga, D., Devarajan, P., Stefańska, A., Dixit, S., Podlasek, A., Sitek, W. y Koda, E. (2024). Emerging trends in the integration of smart sensor technologies in structural health monitoring: a contemporary perspective. *Sensors*, 24, 1-31. <https://doi.org/10.3390/s24248161>

Tabassum, T. y Ahmad, A. (2023). A review of 3d printing technology-the future of sustainable construction. *Materials Today: Proceedings*, 93(P3), 408-414. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.013>

Thirumal, S., Udawatta, N., Karunasena, G. y Al-Ameri, R. (2024). Barriers to Adopting Digital Technologies to Implement Circular Economy Practices in the Construction Industry: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 16(3185), 1-24. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16083185>

Tu, H., Wei, Z., Bahrami, A., Ben Kahla, N., Ahmad, A. y Özkılıç, Y. (2023). Recent advancements and future trends in 3D concrete printing using waste materials. *Developments in the Built Environment*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100187>

Tulk, J. (2018). BIM-based design coordination. En A. Borrmann, M. König, C. Koch y J. Beetz (Eds.), *Building Information Modeling* (pp. 421-446). Springer. <https://doi.org/10.4324/9781315797076>

Universidad Autónoma del Perú. (s. f.). *8 innovaciones tecnológicas en ingeniería civil*. <https://www.autonoma.pe/blog/avances-tecnologia-ingenieria-civil/>

Universidad Católica San Pablo. (s. f.). *Las ventajas de incluir tecnología en la construcción*. <https://postgrado.ucsp.edu.pe/articulos/ventajas-incluir-tecnologia-construccion/>

Valiente, J. y Turro, A. (2024). Gestión ambiental del Ministerio de Educación Superior de Cuba y Tarea Vida en el 2023: impacto en la ética ambiental y economía circular. *Ciencias Holguín*, 30(2), 59-69. <https://www.ciencias.holguin.cu/revista/article/view/315>

Valle-Cruz, D. y Gil-García, J. (2022). Tecnologías emergentes en gobiernos locales: una revisión sistemática de literatura con la metodología PRISMA. *Revista Mexicana de Análisis Político y Administración Pública*, 11(21), 9-28. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9540034>

Venegas-Loor, L. y Moreira-Aguayo, P. (2021). Las tecnologías emergentes y su aplicación a los procesos de enseñanza aprendizaje en educación superior. *Polo del Conocimiento*, 6(1), 864-877. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8219360.pdf>

Vidal-Silva, C., Madariaga, E., Rubio, J. y Urzúa, L. (2019). Estudio de la realidad y viabilidad de la formación en BigData en la Academia Chilena. *Informacion Tecnologica*, 30(5), 239-248. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000500239>

Wang, Z. y Baniotopoulos, C. (2023). Green construction and sustainable development. *Open Journal of Civil Engineering*, 13(2), 317-325. <https://doi.org/10.4236/ojce.2023.132024>

Waqar, A., Othman, I., Saad, N., Azab, M. y Khan, A. (2023). BIM in green building: enhancing sustainability in the small construction project. *Cleaner Environmental Systems*, 11, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2023.100149>

Xiao, B., Chen, C. y Yin, X. (2022). Recent advancements of robotics in construction. *Automation in Construction*, 144, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.aut-con.2022.104591>

Ynzunza, C., Izar, J., Bocarando, J., Aguilar, F. y Larios, M. (2017). El entorno de la industria 4.0: implicaciones y perspectivas futuras. *Conciencia tecnológica*, 54, 33-45. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6405835&info=resumen&idioma=ENG%0A>

Yu, Y., Murat, D., Junjan, V. y Iacob, M-E. (2022). Circular economy in the construction industry: A review of decision support tools based on Information & Communication Technologies. *Journal of Cleaner Production*, 349(131335), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131335>

Zavala, C., Lino, V., Cordero, M. y Sornoza-Parrales, D. (2024). El rol de la ingeniería civil en el desarrollo sostenible: tendencias y desafíos. *Revista Alcance*, 7(1), 1-13. DOI:10.47230/ra.v7i1.57

Zhang, C., Kim, J., Jeon, J., Xing, J., Ahn, C., Tang, P. y Cai, H. (2021). Toward integrated human-machine intelligence for civil engineering: an interdisciplinary perspective. *Computing in Civil Engineering 2021*, 1-8. <https://acortar.link/CDZvIW>

SOBRE LOS AUTORES

Samuel Ccallo Ccahuana

Benito Roggio e Hijos S.A. Sucursal del Perú

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3723-0419>

Edwar Garcia Arevalo

Universidad César Vallejo

<https://orcid.org/0000-0002-6827-2411>

Leonardo Saravia Parra

Universidad Nacional Intercultural de Quillabamba

<https://orcid.org/0009-0001-3367-1121>

Rocky Giban Ayala Bizarro

Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

<https://orcid.org/0000-0003-4333-9357>

INNOVACIÓN EN INGENIERÍA CIVIL:

APLICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS EMERGENTES Y LA ECONOMÍA CIRCULAR EN LA CONSTRUCCIÓN

www.arcoeditores.com
contato@arcoeditores.com
(55)99723-4952

