

Gestión Ambiental e Ingeniería sostenible

ISBN: 978-9942-571-12-0

AUTORES:

Carlos Enrique Parrales García
Julio César Pino Tarragó
Dunia Lisbeth Domínguez Gálvez
Oscar David Villacreses Pincay
Kevin Alexander Delgado Mendoza



Índice

Introducción.....	1
Capítulo I. Fundamentos de la gestión ambiental y la sostenibilidad	4
1.1. Evolución histórica de la gestión ambiental.....	4
1.2. Principios de sostenibilidad y desarrollo sostenible.....	9
1.3. Relación entre medio ambiente, sociedad y economía.....	14
1.4. Marcos normativos y estándares internacionales	19
Capítulo II. Herramientas de ingeniería sostenible para la gestión ambiental	24
2.1. Evaluación de impactos ambientales (EIA) y gestión del ciclo de vida (LCA)..	24
2.2. Eco-diseño, eficiencia energética y economía circular.....	29
2.3. Tecnologías limpias y soluciones basadas en la naturaleza (SbN).	34
2.4. Digitalización y sostenibilidad: Big Data, IoT y simulaciones aplicadas a la ingeniería ambiental.	39
Capítulo III. Aplicaciones y casos prácticos de la ingeniería sostenible	44
3.1. Construcción sostenible y eco-materiales.....	44
3.2. Movilidad y transporte de bajas emisiones.....	49
3.3. Gestión ambiental en la industria manufacturera y minera.	54
3.4. Energías renovables y su integración en sistemas urbanos y rurales.....	59
Referencias	64

Introducción

La gestión ambiental y la ingeniería sostenible se han consolidado en las últimas décadas como campos de estudio y práctica profesional que responden a una transformación profunda en la forma en que las sociedades se relacionan con el entorno natural. El reconocimiento de que los modelos de desarrollo basados en la explotación intensiva de los recursos naturales generan alteraciones ecológicas de gran magnitud ha dado lugar a la búsqueda de marcos conceptuales, normativos y tecnológicos que permitan articular el crecimiento económico y el bienestar social con la conservación de los ecosistemas. En este escenario, la ingeniería, en tanto disciplina orientada al diseño, construcción y operación de sistemas técnicos, desempeña un papel estratégico al integrar criterios ambientales en sus procesos, constituyendo así un soporte fundamental para la transición hacia formas de organización más sostenibles.

El punto de partida para este análisis se encuentra en los fundamentos de la gestión ambiental y de la sostenibilidad. La evolución histórica de la gestión ambiental permite comprender cómo, desde los primeros enfoques centrados en el control de la contaminación, se ha transitado hacia una visión integral que incorpora la dimensión ecológica en la planificación del desarrollo. Este proceso ha estado acompañado de la consolidación de principios de sostenibilidad que se articulan en torno a la necesidad de mantener los sistemas naturales en equilibrio, garantizar la equidad social y promover estructuras económicas compatibles con los límites del planeta. La relación entre medio ambiente, sociedad y economía se configura, en este marco, como un sistema interdependiente que obliga a comprender la gestión ambiental no solo como un ejercicio técnico, sino también como una práctica social e institucional.

Los marcos normativos y los estándares internacionales han desempeñado un papel fundamental en la institucionalización de la gestión ambiental. La estandarización

a través de normas como la ISO 14001 y la ISO 14040, junto con la orientación global de la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, han proporcionado criterios verificables que guían tanto a los Estados como a las organizaciones privadas en la incorporación de prácticas ambientalmente responsables. Estos instrumentos, además, permiten que la ingeniería opere bajo parámetros claros que trascienden las fronteras nacionales, estableciendo un lenguaje común que facilita la cooperación internacional y la implementación de proyectos de diversa índole. En este contexto, la ingeniería no se limita a resolver problemas técnicos, sino que asume una función de mediación entre la normativa, las demandas sociales y las capacidades tecnológicas disponibles, situándose en el centro de la transición hacia sociedades sostenibles.

Sobre la base de estos fundamentos, se desarrollan las herramientas de la ingeniería sostenible aplicadas a la gestión ambiental. La evaluación de impactos ambientales (EIA) y la gestión del ciclo de vida (LCA) constituyen metodologías esenciales que permiten medir y prever los efectos ambientales de proyectos, procesos y productos, ofreciendo así una base empírica para la toma de decisiones informadas. El eco-diseño, junto con la eficiencia energética y la economía circular, introduce enfoques de innovación en el diseño de sistemas productivos, orientados a reducir el consumo de recursos y optimizar la gestión de materiales a lo largo de todo el ciclo de vida.

La incorporación de tecnologías limpias y de soluciones basadas en la naturaleza representa un campo de expansión que combina conocimiento científico, innovación tecnológica y procesos ecológicos para la gestión ambiental. Estas tecnologías permiten articular sistemas productivos con dinámicas naturales, reduciendo las presiones sobre los ecosistemas y generando nuevas formas de interacción entre lo humano y lo no humano. Los modelos de gestión de recursos, orientados específicamente al agua, la energía, los residuos y los materiales, constituyen ámbitos de aplicación donde la

ingeniería integra procesos de planificación, monitoreo y control bajo criterios de sostenibilidad. La digitalización de la gestión ambiental, mediante herramientas como el Big Data, el Internet de las Cosas (IoT) y las simulaciones avanzadas, abre un campo de análisis que redefine las capacidades de predicción, control y adaptación en tiempo real, situando a la ingeniería en la vanguardia de la transición digital aplicada a la sostenibilidad.

El desarrollo conceptual y metodológico se materializa en aplicaciones concretas que permiten observar la ingeniería sostenible en acción. La construcción sostenible y el uso de eco-materiales muestran cómo los criterios ambientales se incorporan en uno de los sectores de mayor impacto global, transformando tanto los procesos constructivos como los productos resultantes. La movilidad y el transporte de bajas emisiones constituyen otro campo en el que la ingeniería redefine infraestructuras y tecnologías para reducir la dependencia de combustibles fósiles y reorganizar los sistemas de transporte bajo criterios de sostenibilidad. La gestión ambiental en la industria manufacturera y minera representa un desafío técnico particular, pues se trata de sectores estratégicos en los que la incorporación de criterios ambientales debe coexistir con procesos de alta intensidad productiva y grandes volúmenes de extracción de recursos.

Finalmente, las perspectivas futuras de la resiliencia climática y de la adaptación tecnológica permiten proyectar cómo la ingeniería deberá responder ante un escenario caracterizado por la variabilidad climática, la emergencia de nuevas tecnologías y la necesidad de consolidar sistemas capaces de absorber perturbaciones sin perder su funcionalidad.

Capítulo I. Fundamentos de la gestión ambiental y la sostenibilidad

1.1. Evolución histórica de la gestión ambiental.

La gestión ambiental, como campo de estudio y práctica institucional, constituye el resultado de un proceso histórico en el que confluyen transformaciones sociales, científicas, políticas y tecnológicas. Su desarrollo no puede entenderse de manera aislada, sino en diálogo permanente con las dinámicas de cambio cultural y con la construcción de marcos normativos internacionales. A lo largo de la historia, las sociedades humanas han establecido distintas formas de interacción con el entorno, desde una explotación inicial basada en la disponibilidad inmediata de recursos hasta la conformación de sistemas regulados por criterios científicos y jurídicos. Esta evolución, marcada por la progresiva conciencia sobre los impactos de la actividad humana en los ecosistemas, permite comprender el carácter sistémico y multidimensional de la gestión ambiental contemporánea (Fernandes et al., 2021).

Los antecedentes más remotos se encuentran en prácticas empíricas de regulación del uso de recursos en sociedades agrícolas antiguas. Diversas civilizaciones, como las asentadas en Mesopotamia, Egipto, China o Mesoamérica, implementaron mecanismos de control en torno al agua, los suelos y los bosques. Estos mecanismos respondían a la necesidad de garantizar la continuidad de la producción agrícola y la estabilidad social. En los códigos jurídicos de algunas de estas sociedades se observan disposiciones relativas al uso común de los recursos hídricos, a la delimitación de tierras de cultivo y al establecimiento de reservas forestales destinadas a actividades específicas. Aunque carecían del lenguaje conceptual moderno, estos antecedentes representan formas tempranas de gestión ambiental que buscaban mantener un equilibrio entre las necesidades humanas y las condiciones naturales.

En el periodo medieval, la relación entre ambiente y sociedad adquirió nuevas configuraciones, particularmente en Europa y Asia. La expansión urbana, el desarrollo de actividades artesanales y el crecimiento demográfico generaron presiones significativas sobre los ecosistemas. Durante este periodo, las instituciones políticas comenzaron a establecer ordenanzas dirigidas al control de vertidos en ríos, a la regulación de la tala de bosques y al manejo de tierras comunales (Awewomom et al., 2024). Documentos históricos de ciudades como Londres, Venecia o Nuremberg evidencian la existencia de normas que limitaban la contaminación de cursos de agua utilizados para el abastecimiento de la población. De manera paralela, en Japón se desarrollaron políticas de aprovechamiento forestal planificado que respondían a una concepción integral del territorio como espacio vital y productivo. Estas regulaciones, si bien fragmentarias y localizadas, constituyen hitos relevantes en la consolidación de la gestión ambiental como práctica social organizada.

El inicio de la modernidad introdujo transformaciones profundas en la relación entre sociedad y medio ambiente. El proceso de industrialización, iniciado en Europa durante el siglo XVIII, redefinió los patrones de uso de recursos y de producción de desechos. La demanda de carbón, hierro, agua y tierras impulsó una explotación intensiva sin precedentes, generando una serie de impactos visibles en la calidad del aire, en la degradación de suelos y en la contaminación de ríos (Wren & Bedeian, 2023). La Revolución Industrial no solo modificó la base tecnológica de las sociedades, sino que también introdujo nuevas problemáticas que exigieron respuestas distintas a las conocidas hasta entonces. Los primeros informes médicos y científicos que documentaban enfermedades asociadas a la polución atmosférica, como las surgidas en Manchester o Londres, marcaron un punto de inflexión al vincular de manera directa los procesos productivos con la salud pública.

Durante el siglo XIX, la creciente visibilidad de los efectos ambientales motivó la creación de estructuras normativas y administrativas iniciales. Gobiernos europeos y norteamericanos comenzaron a establecer agencias de control de recursos forestales, oficinas de saneamiento urbano y reglamentos de gestión de aguas. La silvicultura científica en Alemania y Francia, por ejemplo, surgió como una disciplina que buscaba regular el aprovechamiento de los bosques mediante criterios de planificación a largo plazo. En Estados Unidos, la creación de parques nacionales, iniciada con Yellowstone en 1872, representó una innovación institucional destinada a conservar territorios considerados de alto valor natural y cultural. Estas iniciativas expresaban el surgimiento de una racionalidad distinta, orientada no solo a la explotación, sino también a la conservación de ciertos espacios y recursos (Deng et al., 2021).

El siglo XX constituye la etapa decisiva en la consolidación de la gestión ambiental como campo institucional y científico. En las primeras décadas, los avances en las ciencias naturales, en particular la ecología, aportaron fundamentos teóricos para comprender los ecosistemas como sistemas complejos caracterizados por interacciones dinámicas. La noción de equilibrio ecológico, ampliamente difundida en la primera mitad del siglo, proporcionó un marco conceptual que sustentó políticas de conservación y manejo de áreas protegidas. Paralelamente, la urbanización acelerada y la intensificación de la actividad industrial evidenciaron la necesidad de establecer marcos regulatorios más amplios, capaces de abarcar problemas como la calidad del aire, la gestión de residuos y el tratamiento de aguas residuales (McNeill & Mauldin, 2025).

A partir de la década de 1960, se observa una expansión significativa del campo ambiental en la agenda internacional. Diversos episodios críticos, como los derrames de petróleo, la contaminación por plaguicidas documentada en la obra científica de Rachel Carson o los episodios de smog en ciudades como Londres y Los Ángeles, visibilizaron

la magnitud de los problemas ambientales a escala global. Estos acontecimientos estimularon la creación de instituciones gubernamentales especializadas, como la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos en 1970, y la promulgación de legislaciones ambientales integrales en numerosos países. Asimismo, emergió un movimiento social ambientalista que contribuyó a articular demandas ciudadanas con la formulación de políticas públicas.

Un momento decisivo en esta evolución fue la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano, celebrada en Estocolmo en 1972. Este evento constituyó la primera reunión intergubernamental de carácter mundial dedicada exclusivamente a los problemas ambientales (Tan et al., 2021). De la conferencia surgió el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), organismo que desde entonces ha desempeñado un papel central en la coordinación de políticas globales. A partir de Estocolmo, la gestión ambiental adquirió una dimensión internacional explícita, orientada a establecer principios comunes y a promover la cooperación entre estados.

Durante las décadas posteriores, la gestión ambiental se expandió como disciplina técnica y académica. Se incorporaron metodologías de evaluación de impacto ambiental, herramientas de planificación territorial y marcos normativos de carácter vinculante. En paralelo, se consolidó la noción de desarrollo sostenible, formalizada en 1987 por la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo a través del Informe Brundtland. Este concepto integró las dimensiones ambiental, social y económica en una perspectiva unitaria, otorgando a la gestión ambiental un papel estratégico en la formulación de políticas de desarrollo. A partir de entonces, la gestión ambiental dejó de ser entendida únicamente como conservación de recursos y pasó a concebirse como componente esencial de los procesos de planificación integral.

En el tránsito hacia el siglo XXI, la gestión ambiental se fortaleció con la adopción de acuerdos internacionales de gran relevancia, como el Protocolo de Kioto de 1997 y el Acuerdo de París de 2015. Estos instrumentos reflejan un proceso histórico en el que los problemas ambientales, particularmente el cambio climático, se configuran como asuntos de gobernanza global. De manera complementaria, la consolidación de estándares internacionales como las normas ISO 14000, iniciadas en 1996, ofreció a las organizaciones herramientas de gestión basadas en criterios de mejora continua y responsabilidad ambiental. El surgimiento de estos estándares representó un paso decisivo hacia la institucionalización de la gestión ambiental en el ámbito empresarial y organizacional (Zhang et al., 2022).

En la actualidad, la gestión ambiental se reconoce como un campo interdisciplinario que articula conocimientos de las ciencias naturales, las ciencias sociales, la ingeniería y el derecho. Su evolución histórica demuestra un tránsito desde prácticas empíricas locales hasta sistemas globales de regulación y cooperación. Este recorrido evidencia la creciente centralidad del ambiente en la organización de la vida social y en la construcción de marcos de acción colectiva (Tjahjadi et al., 2023). Asimismo, la gestión ambiental contemporánea se sustenta en la noción de que los procesos de desarrollo humano deben integrarse armónicamente con las condiciones biofísicas del planeta, principio que sintetiza la trayectoria histórica iniciada hace miles de años y que se proyecta hacia los retos del presente y el futuro.

1.2. Principios de sostenibilidad y desarrollo sostenible.

El concepto de sostenibilidad, en su dimensión contemporánea, se configura como una categoría central para comprender y orientar las relaciones entre sistemas humanos y sistemas naturales. Su emergencia responde a la necesidad de articular marcos normativos, éticos y científicos que guíen los procesos de desarrollo bajo criterios de continuidad temporal y equilibrio ecológico. La sostenibilidad se establece como un principio ordenador que busca integrar la preservación de las condiciones biofísicas con la satisfacción de las necesidades sociales y el funcionamiento de las estructuras económicas. De esta manera, los principios de sostenibilidad y de desarrollo sostenible se constituyen en referentes universales que permiten estructurar políticas públicas, estrategias institucionales y prácticas sociales a diferentes escalas (Ruggerio, 2021).

La definición de desarrollo sostenible adquirió visibilidad internacional a través del Informe de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo, conocido como Informe Brundtland, publicado en 1987. En dicho documento se enunció la idea de un desarrollo capaz de satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas. Esta formulación, de carácter normativo y abierto, establece un horizonte de acción sustentado en la equidad intergeneracional y en la compatibilidad entre progreso social, crecimiento económico y protección ambiental. A partir de este momento, el desarrollo sostenible se consolidó como un paradigma orientador de políticas globales y nacionales, así como de procesos académicos y técnicos.

La sostenibilidad se fundamenta en un conjunto de principios que estructuran su marco conceptual. Entre los más relevantes se encuentran la equidad intergeneracional, la equidad intrageneracional, la integración de dimensiones sociales, económicas y ambientales, la precaución frente a la incertidumbre científica, la participación social en

la toma de decisiones, la responsabilidad común pero diferenciada y la mejora continua. Estos principios no constituyen únicamente enunciados abstractos, sino que se han traducido en directrices concretas para el diseño de marcos regulatorios, para la formulación de estándares internacionales y para la implementación de políticas públicas (Trusina & Jermolajeva, 2021).

La equidad intergeneracional constituye uno de los fundamentos esenciales del desarrollo sostenible. Este principio plantea la necesidad de garantizar que las generaciones futuras dispongan de condiciones ambientales, sociales y económicas que les permitan satisfacer sus necesidades y desarrollar sus proyectos de vida. La formulación de este criterio implica reconocer que los recursos naturales no deben considerarse como bienes de consumo ilimitados, sino como patrimonios colectivos cuya conservación resulta indispensable para asegurar la continuidad de la vida en el planeta. Este principio, al situar en el centro la responsabilidad hacia el futuro, introduce una dimensión temporal extendida en los procesos de planificación y gestión.

De manera complementaria, la equidad intrageneracional se refiere a la distribución justa de los beneficios y costos derivados de los procesos de desarrollo entre los distintos grupos sociales de una misma generación. Este principio busca garantizar que el acceso a los recursos, a los servicios ecosistémicos y a las oportunidades económicas no se concentre en sectores específicos de la población, sino que se configure en términos de justicia social. La equidad intrageneracional reconoce la diversidad de contextos culturales y socioeconómicos, y se convierte en un criterio normativo que orienta las políticas hacia la reducción de desigualdades (Robertson, 2021).

Otro principio central es la integración de las dimensiones social, económica y ambiental. Este criterio parte de la premisa de que el desarrollo sostenible no puede concebirse como un proceso fragmentado, sino como un entramado en el que interactúan

simultáneamente múltiples factores. La dimensión social incorpora aspectos relacionados con la calidad de vida, la educación, la salud y la cohesión comunitaria. La dimensión económica se orienta hacia la generación de valor, la productividad y la estabilidad financiera. La dimensión ambiental se centra en la preservación de los ecosistemas, en la gestión de los recursos y en la mitigación de impactos negativos. La sostenibilidad, en este sentido, exige que los procesos de desarrollo articulen de manera equilibrada estas tres esferas, evitando que el predominio de una de ellas comprometa la estabilidad de las otras.

El principio de precaución constituye otro eje fundamental. Este se basa en la idea de que, en situaciones de incertidumbre científica respecto a posibles daños graves o irreversibles al ambiente, la ausencia de certeza no debe utilizarse como justificación para postergar la adopción de medidas preventivas. Este criterio, ampliamente reconocido en acuerdos internacionales, introduce un marco ético y técnico para la toma de decisiones en contextos donde el conocimiento científico es limitado, pero los riesgos potenciales son significativos (Hariram et al., 2023). El principio precautorio, al orientar la acción hacia la prevención, amplía el alcance de la gestión ambiental y refuerza la noción de responsabilidad en condiciones de incertidumbre.

La participación social se constituye como otro principio estructurador. Este se refiere a la inclusión de los distintos actores de la sociedad en los procesos de toma de decisiones que afectan el ambiente y el desarrollo. El reconocimiento de este principio responde a la necesidad de democratizar los procesos de gestión y de incorporar saberes locales, experiencias comunitarias y perspectivas diversas en la formulación de políticas. La participación no solo fortalece la legitimidad de las decisiones, sino que también amplía la base de conocimiento disponible para la gestión sostenible.

La responsabilidad común pero diferenciada es un principio desarrollado en el marco del derecho internacional ambiental. Este plantea que, si bien todos los Estados comparten la responsabilidad de proteger el ambiente y de promover el desarrollo sostenible, no todos poseen las mismas capacidades ni han contribuido en igual medida a los problemas ambientales globales (Abeysekera, 2022). En consecuencia, este principio establece que las obligaciones deben distribuirse de manera diferenciada, tomando en cuenta las circunstancias históricas, económicas y tecnológicas de cada país. Este criterio ha sido especialmente relevante en las negociaciones internacionales sobre cambio climático y biodiversidad.

El principio de mejora continua complementa el conjunto de fundamentos de la sostenibilidad. Este se refiere a la necesidad de establecer procesos permanentes de revisión, evaluación y perfeccionamiento de las políticas, de las prácticas institucionales y de los instrumentos técnicos. La sostenibilidad no se concibe como un estado estático, sino como un proceso dinámico que requiere ajustes constantes frente a los cambios sociales, ambientales y tecnológicos. La mejora continua se traduce en la incorporación sistemática de innovaciones y aprendizajes en la gestión del desarrollo (Sparviero & Ragnedda, 2021).

La formalización de estos principios ha sido reforzada por la incorporación de la sostenibilidad en instrumentos internacionales y en marcos normativos. Documentos como la Declaración de Río sobre Medio Ambiente y Desarrollo de 1992, la Agenda 21, los Objetivos de Desarrollo del Milenio (2000) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (2015) han contribuido a consolidar un consenso global en torno a la centralidad de la sostenibilidad. Estos marcos han permitido articular compromisos multilaterales, generar indicadores de seguimiento y orientar la acción de gobiernos, empresas y organizaciones sociales.

En el ámbito académico, los principios de sostenibilidad han propiciado el desarrollo de múltiples enfoques teóricos y metodológicos. La economía ecológica, la ética ambiental, la ingeniería sostenible y la sociología del ambiente son algunos de los campos que han incorporado dichos principios como referentes analíticos y normativos. Estas disciplinas, al dialogar con los fundamentos de la sostenibilidad, han ampliado las posibilidades de investigación y han fortalecido la base conceptual del desarrollo sostenible.

El desarrollo sostenible, entendido como la operacionalización práctica de la sostenibilidad, se ha constituido en un eje articulador de políticas a nivel nacional y local. Su aplicación implica traducir los principios en estrategias de planificación territorial, en sistemas de gestión organizacional y en programas de desarrollo comunitario. En este proceso, los principios funcionan como criterios de orientación que guían la coherencia y la consistencia de las acciones emprendidas (Guarini et al., 2022).

En síntesis, los principios de sostenibilidad y desarrollo sostenible constituyen el marco normativo y conceptual que orienta la integración entre sociedad, economía y ambiente. Su formulación ha sido resultado de un proceso histórico de construcción colectiva que combina reflexiones éticas, avances científicos y acuerdos internacionales. Estos principios, al establecer criterios universales de equidad, integración, precaución, participación, responsabilidad diferenciada y mejora continua, ofrecen la base para la estructuración de un modelo de desarrollo que busca perdurar en el tiempo y responder a las exigencias de justicia intergeneracional e intrageneracional (Chen et al., 2021). La sostenibilidad, en consecuencia, se configura como un principio rector que trasciende fronteras disciplinarias y geográficas, y que se proyecta como fundamento esencial en la organización de la vida social contemporánea.

1.3. Relación entre medio ambiente, sociedad y economía

La relación entre medio ambiente, sociedad y economía constituye uno de los ejes centrales del pensamiento contemporáneo sobre sostenibilidad y gestión ambiental. Esta relación se configura como un entramado complejo en el que los sistemas naturales y los sistemas humanos interactúan de manera constante, produciendo dinámicas de interdependencia que atraviesan múltiples escalas temporales y espaciales. Comprender esta interacción requiere un abordaje interdisciplinario capaz de integrar conocimientos de la ecología, la economía, la sociología, la geografía y la ingeniería, entre otras áreas. En este marco, el ambiente no se concibe como un escenario externo a la sociedad, sino como un componente constitutivo de los procesos sociales y económicos (Dong et al., 2021).

Desde una perspectiva histórica, la relación entre medio ambiente, sociedad y economía ha estado presente en distintos modelos de organización social. En sociedades agrícolas antiguas, la producción dependía directamente de la disponibilidad de suelos fértiles, agua y biodiversidad. La regulación de ciclos agrícolas y el control de inundaciones fueron expresiones de un reconocimiento implícito de la interdependencia entre sistemas naturales y sistemas humanos. Con el advenimiento de la industrialización, esta relación se transformó mediante la intensificación del uso de combustibles fósiles, la expansión de los mercados y la urbanización acelerada. En este contexto, la economía pasó a depender de un consumo creciente de recursos naturales y de la generación de residuos, lo que visibilizó con mayor fuerza los vínculos entre producción económica y condiciones ambientales (Walker et al., 2022).

La sociedad, en tanto conjunto de estructuras culturales, institucionales y organizativas, se encuentra mediada por el ambiente y por la economía. Las instituciones sociales han establecido normas, valores y prácticas que regulan el acceso y el uso de los

recursos. Estas regulaciones, que pueden expresarse en costumbres locales o en marcos normativos internacionales, constituyen formas de mediación que buscan garantizar la continuidad de los procesos sociales. La cultura, entendida como conjunto de conocimientos, creencias y representaciones, también se configura en estrecha relación con el ambiente, pues en ella se expresan las percepciones y significados que las comunidades asignan a los territorios y a los recursos.

La economía, como sistema de producción, distribución y consumo de bienes y servicios, depende de manera directa de la base material proporcionada por los ecosistemas. Los recursos naturales actúan como insumos fundamentales para la generación de valor económico, mientras que los servicios ecosistémicos ofrecen soporte a actividades productivas y a la vida humana en general (Tu et al., 2023). De este modo, la economía no puede considerarse un sistema cerrado, sino un subsistema contenido dentro del sistema ambiental. Esta visión, desarrollada desde la economía ecológica, sitúa al ambiente como límite y condición estructural de los procesos económicos.

En las últimas décadas, diversos modelos teóricos han buscado representar la relación entre medio ambiente, sociedad y economía. Uno de los más influyentes ha sido el modelo de los tres pilares de la sostenibilidad, que propone un equilibrio entre las dimensiones social, económica y ambiental. Este enfoque gráfico y conceptual ilustra la necesidad de integrar estas dimensiones para lograr un desarrollo coherente. Sin embargo, otros enfoques, como el de los círculos concéntricos, ubican la economía dentro de la sociedad y a ambas dentro del ambiente, subrayando la dependencia jerárquica de los sistemas humanos respecto de los sistemas naturales. Estos modelos no solo representan esquemas conceptuales, sino que han servido como base para la formulación de políticas y estrategias de gestión.

La relación entre medio ambiente y sociedad se manifiesta en múltiples formas. Los ecosistemas proporcionan bienes y servicios que sostienen la vida humana: agua, alimentos, energía, fibras, regulación climática y espacios culturales. A su vez, las actividades sociales influyen en la configuración de los paisajes, en la biodiversidad y en los ciclos biogeoquímicos (Duong & Hai Thi Thanh, 2022). La sociedad produce instituciones de manejo de recursos, tecnologías de transformación y marcos normativos que modifican las dinámicas ambientales. De esta interacción surge un proceso de coevolución en el que tanto los sistemas naturales como los sociales se transforman de manera recíproca.

En cuanto a la relación entre medio ambiente y economía, se observa que los recursos naturales constituyen la base material de la producción. Sin energía, minerales, suelos fértiles y agua, los sistemas económicos no podrían sostenerse. Los residuos y emisiones derivados de la producción y el consumo retornan al ambiente, alterando su capacidad de regeneración. Esta retroalimentación ha sido objeto de estudio en teorías como la de los límites al crecimiento, propuesta en la década de 1970, que advertía sobre la imposibilidad de sostener un crecimiento económico infinito en un planeta con recursos finitos. Tales planteamientos introdujeron la necesidad de concebir la economía como un subsistema dependiente de la biosfera (Li et al., 2023).

Por su parte, la relación entre sociedad y economía se traduce en instituciones, mercados, sistemas de intercambio y patrones de consumo. La sociedad define valores y prioridades que orientan el rumbo de la economía, al tiempo que los resultados económicos influyen en las condiciones de vida, en la distribución del ingreso y en la cohesión social. La economía constituye así un mediador fundamental entre la sociedad y el ambiente, dado que organiza el acceso, la transformación y la distribución de los recursos.

El análisis integrado de estas tres dimensiones ha dado lugar a marcos de evaluación que permiten medir y monitorear las interacciones. Indicadores como la huella ecológica, el producto interno bruto verde, el índice de desarrollo humano ajustado ambientalmente y los sistemas de contabilidad de capital natural constituyen intentos de reflejar las interdependencias entre ambiente, sociedad y economía en cifras comparables. Estas herramientas de medición han sido impulsadas por organismos internacionales con el fin de orientar políticas públicas y de generar información para la toma de decisiones (Umar & Safi, 2023).

La relación entre medio ambiente, sociedad y economía también se expresa en el ámbito de la planificación territorial. Los usos del suelo, las infraestructuras urbanas, las redes de transporte y los sistemas energéticos configuran paisajes en los que confluyen dinámicas naturales y humanas. La planificación busca organizar el territorio de manera que se articulen los objetivos sociales y económicos con las capacidades y limitaciones ambientales. En este contexto, la gestión ambiental actúa como mecanismo de integración entre las distintas escalas de planificación.

La extracción de materias primas en un continente puede estar destinada al consumo en otro, mientras que los efectos ambientales de dichas actividades, como las emisiones de gases de efecto invernadero, tienen repercusiones a escala planetaria. De esta manera, la relación entre medio ambiente, sociedad y economía se convierte en un asunto de gobernanza global que exige marcos de cooperación internacional.

La educación y la investigación científica también desempeñan un papel en la configuración de esta relación. La producción de conocimiento permite comprender los mecanismos de interacción y desarrollar metodologías para su análisis. La educación, a su vez, difunde valores y principios que orientan la manera en que la sociedad percibe y organiza su relación con el ambiente y la economía. Instituciones académicas, centros de

investigación y organismos multilaterales han impulsado la consolidación de un campo interdisciplinario dedicado a estudiar estas interacciones (Yousaf et al., 2021). Finalmente, es importante señalar que la relación entre medio ambiente, sociedad y economía no se reduce a una mera coexistencia, sino que constituye un sistema dinámico de interdependencias en constante transformación. Los cambios tecnológicos, los procesos culturales, las transiciones demográficas y las variaciones en los ecosistemas introducen modificaciones continuas en esta relación. En este sentido, el estudio de la interacción tripartita requiere enfoques flexibles y de largo plazo que reconozcan la complejidad de los procesos involucrados.

En síntesis, la relación entre medio ambiente, sociedad y economía representa un campo analítico y normativo central para la gestión ambiental y el desarrollo sostenible. Su comprensión exige reconocer la interdependencia entre sistemas naturales y humanos, así como la necesidad de articular de manera coherente los objetivos sociales, económicos y ambientales (Mughal et al., 2022). A lo largo de la historia, esta relación ha evolucionado desde formas empíricas de manejo de recursos hasta modelos teóricos y normativos de carácter global. Hoy constituye el fundamento sobre el cual se construyen las políticas de sostenibilidad y los marcos de gestión orientados a garantizar la continuidad de la vida humana y la estabilidad de los ecosistemas en el tiempo.

1.4. Marcos normativos y estándares internacionales

La consolidación de la gestión ambiental como campo institucional ha estado acompañada por el desarrollo de un conjunto de marcos normativos y estándares internacionales que regulan, orientan y armonizan las acciones de los Estados, de las organizaciones y de las comunidades en torno al ambiente. Estos marcos constituyen el entramado jurídico y técnico mediante el cual la comunidad internacional ha buscado responder a problemas ambientales de carácter local, regional y global. En ellos se expresa la construcción de consensos, la institucionalización de principios y la generación de instrumentos vinculantes o voluntarios que permiten articular las dimensiones ambientales, sociales y económicas en procesos de gobernanza multinivel (Gautam et al., 2024).

El origen de los marcos normativos ambientales a escala internacional puede rastrearse en la segunda mitad del siglo XX, momento en el que la problemática ambiental comenzó a ocupar un lugar destacado en la agenda de Naciones Unidas. Si bien existieron precedentes de acuerdos bilaterales y regionales sobre temas específicos, como la regulación de la caza de ballenas en 1946 o la protección de humedales en la Convención de Ramsar de 1971, la primera formulación integral se dio en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano, celebrada en Estocolmo en 1972. De esta conferencia emanó la Declaración de Estocolmo, que estableció principios generales sobre la relación entre ser humano y ambiente, y dio origen al Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). La Declaración reconoció la necesidad de integrar las consideraciones ambientales en el desarrollo y se convirtió en un punto de referencia para la construcción posterior de acuerdos internacionales (Abbott & Snidal, 2021).

Durante la década de 1980, la consolidación del concepto de desarrollo sostenible a través del Informe Brundtland marcó un cambio significativo en los marcos normativos. A partir de entonces, los instrumentos internacionales comenzaron a vincular de manera explícita la protección ambiental con los objetivos de desarrollo económico y social. Este giro se hizo evidente en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, celebrada en Río de Janeiro en 1992. En este evento se adoptaron documentos fundamentales como la Declaración de Río sobre Medio Ambiente y Desarrollo, que incluyó 27 principios orientadores, la Agenda 21, que delineó un plan de acción global para la sostenibilidad, y dos convenciones de gran relevancia: la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB).

La Declaración de Río institucionalizó principios como el de precaución, el de responsabilidades comunes pero diferenciadas y el de participación ciudadana. Estos principios, aunque de carácter declarativo, han servido como base jurídica y política para la elaboración de tratados posteriores y para la integración de la sostenibilidad en las legislaciones nacionales (Puri et al., 2023). La Agenda 21, por su parte, funcionó como una hoja de ruta para la incorporación de la sostenibilidad en múltiples sectores, desde la planificación urbana hasta la gestión de recursos hídricos. Tanto la CMNUCC como el CDB establecieron marcos vinculantes que han dado lugar a protocolos, planes de acción y mecanismos financieros destinados a enfrentar los problemas ambientales más relevantes a escala global.

En 1997, el Protocolo de Kioto, derivado de la CMNUCC, estableció compromisos cuantificados de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero para países industrializados. Este instrumento introdujo mecanismos de flexibilidad como el comercio de emisiones, los mecanismos de desarrollo limpio y la implementación

conjunta, los cuales reflejaron un intento de vincular objetivos ambientales con instrumentos económicos. Posteriormente, en 2015, el Acuerdo de París representó un nuevo hito al establecer compromisos nacionales determinados (NDC) con el objetivo de mantener el incremento de la temperatura media global por debajo de 2 °C respecto a niveles preindustriales, con esfuerzos adicionales para limitarlo a 1,5 °C. El Acuerdo de París destacó por su carácter inclusivo, al involucrar tanto a países industrializados como a países en desarrollo en la acción climática (Turnbull et al., 2021).

En paralelo, el Convenio sobre la Diversidad Biológica impulsó la adopción de planes estratégicos para la conservación de especies y ecosistemas, así como para la distribución justa y equitativa de los beneficios derivados del uso de los recursos genéticos. Documentos como el Protocolo de Cartagena sobre Bioseguridad (2000) y el Protocolo de Nagoya sobre Acceso a los Recursos Genéticos y Participación en los Beneficios (2010) reflejan la progresiva especialización de los marcos normativos en función de problemáticas concretas. De manera similar, el Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de Desechos Peligrosos y su Eliminación (1989), el Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (2001) y el Convenio de Minamata sobre el Mercurio (2013) establecieron regulaciones internacionales sobre sustancias químicas y residuos con implicaciones ambientales y de salud.

En el ámbito de la gestión forestal y de los recursos naturales, la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (1994) se constituyó como un instrumento orientado a la prevención y reversión de procesos de degradación de tierras, especialmente en regiones áridas y semiáridas. Asimismo, la creación de mecanismos financieros internacionales, como el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF, por

sus siglas en inglés), ha complementado los marcos normativos proporcionando recursos para la implementación de proyectos de sostenibilidad en países en desarrollo.

Junto con los tratados internacionales, los estándares voluntarios han desempeñado un papel fundamental en la institucionalización de la gestión ambiental. Entre estos destacan las normas ISO de la serie 14000, desarrolladas por la Organización Internacional de Normalización a partir de 1996 (Barbosa et al., 2021). Estas normas establecen lineamientos para la implementación de sistemas de gestión ambiental en organizaciones públicas y privadas, basados en principios de mejora continua, cumplimiento legal y prevención de la contaminación. ISO 14001, en particular, se ha convertido en el estándar de referencia a nivel global para certificar sistemas de gestión ambiental. La adopción de estos estándares ha permitido homogeneizar prácticas, facilitar la integración de la dimensión ambiental en las operaciones organizacionales y promover la transparencia mediante auditorías y certificaciones independientes.

Además de ISO 14001, otras normas relacionadas como ISO 14040 e ISO 14044 regulan la metodología de análisis de ciclo de vida, mientras que ISO 14064 y 14065 se centran en la cuantificación y verificación de gases de efecto invernadero. Estos estándares, aunque de carácter voluntario, han adquirido relevancia global al ser adoptados por empresas multinacionales, organismos públicos y sistemas de acreditación. Su influencia trasciende el ámbito técnico, pues contribuyen a generar un lenguaje común en la gestión ambiental a nivel internacional (Awewomom et al., 2024).

El marco normativo internacional también se ha visto fortalecido por las agendas globales de desarrollo. Los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), establecidos en el año 2000, incorporaron la sostenibilidad ambiental como uno de sus ocho objetivos, específicamente el objetivo número siete. Posteriormente, en 2015, la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible amplió este enfoque a través de 17 Objetivos de Desarrollo

Sostenible (ODS), de los cuales varios están directamente vinculados con la gestión ambiental, como el ODS 6 sobre agua limpia y saneamiento, el ODS 7 sobre energía asequible y no contaminante, el ODS 13 sobre acción por el clima, el ODS 14 sobre vida submarina y el ODS 15 sobre vida de ecosistemas terrestres. Los ODS representan un consenso global que articula dimensiones ambientales, sociales y económicas en un marco normativo flexible y de aplicación universal (Razzaq et al., 2023).

La interacción entre marcos normativos vinculantes, estándares voluntarios y agendas de desarrollo global configura un entramado institucional complejo en el que convergen múltiples actores y niveles de gobernanza. Estados, organismos internacionales, empresas, organizaciones de la sociedad civil y comunidades locales participan en la construcción y aplicación de estos instrumentos. En este contexto, la gestión ambiental adquiere un carácter transversal que atraviesa sectores productivos, políticas públicas y dinámicas territoriales (Hao et al., 2022).

En síntesis, los marcos normativos y estándares internacionales constituyen la arquitectura institucional sobre la cual se estructura la gestión ambiental global. Su desarrollo histórico refleja la progresiva toma de conciencia acerca de la dimensión planetaria de los problemas ambientales y la necesidad de articular respuestas coordinadas. Desde los primeros acuerdos sectoriales hasta los sistemas integrales de normas y agendas, estos instrumentos han permitido institucionalizar principios de sostenibilidad, establecer mecanismos de cooperación internacional y promover la integración de la dimensión ambiental en las políticas de desarrollo. Al mismo tiempo, han generado un lenguaje común que facilita la interacción entre actores diversos en contextos locales, nacionales y globales.

Capítulo II. Herramientas de ingeniería sostenible para la gestión ambiental

2.1. Evaluación de impactos ambientales (EIA) y gestión del ciclo de vida (LCA).

La evaluación de impactos ambientales (EIA) y la gestión del ciclo de vida (LCA, por sus siglas en inglés) constituyen instrumentos metodológicos fundamentales en el ámbito de la gestión ambiental y la ingeniería sostenible. Ambas metodologías responden a la necesidad de comprender, analizar y organizar las interacciones entre actividades humanas y sistemas naturales, proporcionando marcos de referencia para la toma de decisiones fundamentadas en criterios científicos y técnicos. Aunque sus objetivos y aplicaciones presentan diferencias, la EIA y la LCA comparten una orientación común hacia la identificación, medición y gestión de los efectos ambientales asociados a proyectos, procesos o productos, lo cual las sitúa en el núcleo del análisis ambiental contemporáneo (Adeleke et al., 2022).

La evaluación de impactos ambientales surge como una herramienta de carácter normativo y procedimental vinculada a la aprobación de proyectos específicos. Su propósito central es identificar, predecir e interpretar las consecuencias ambientales de actividades propuestas, considerando factores físicos, biológicos, sociales y culturales. Desde su institucionalización en la década de 1970, con la promulgación de la National Environmental Policy Act (NEPA) en los Estados Unidos, la EIA se ha consolidado como un requisito formal en numerosos países, regulado por marcos jurídicos nacionales e internacionales. La metodología de la EIA se estructura en fases que incluyen la delimitación del alcance, la descripción del proyecto y del entorno, la identificación de impactos potenciales, la predicción de su magnitud y significancia, la evaluación de alternativas y la propuesta de medidas de mitigación y monitoreo.

La EIA posee una dimensión preventiva, en tanto busca anticipar los efectos antes de la ejecución de una actividad, lo cual permite incorporar criterios ambientales en la

fase de planificación. Su aplicación abarca proyectos de infraestructura, actividades extractivas, desarrollos industriales, planes territoriales y, en general, cualquier iniciativa susceptible de generar impactos relevantes en el ambiente. A través de este procedimiento, se promueve la incorporación sistemática del conocimiento científico y técnico en la toma de decisiones, estableciendo un canal formal de integración entre autoridades, promotores de proyectos y comunidades afectadas (dos Muchangos et al., 2025).

Por su parte, la gestión del ciclo de vida se sitúa dentro de un marco metodológico más amplio que trasciende la evaluación de proyectos individuales para abarcar el análisis integral de productos, procesos y servicios desde la extracción de materias primas hasta la disposición final. La LCA, consolidada a partir de las directrices de la Organización Internacional de Normalización (ISO 14040 y 14044), propone un enfoque holístico que considera todas las etapas del ciclo de vida: adquisición de recursos, producción, distribución, uso, reutilización, reciclaje y disposición. En este contexto, el producto o servicio no se analiza de manera aislada, sino como un conjunto de flujos materiales y energéticos que interactúan con el ambiente a lo largo de su existencia.

La LCA se desarrolla mediante cuatro fases fundamentales: definición de objetivos y alcance, análisis del inventario, evaluación de impactos y análisis de interpretación. En la primera fase se delimitan los propósitos del estudio y los límites del sistema a analizar. En el análisis de inventario se recopilan y organizan datos cuantitativos sobre entradas (energía, materiales, agua) y salidas (emisiones, residuos, productos). La fase de evaluación de impactos convierte estos flujos en categorías ambientales cuantificables, como cambio climático, acidificación, eutrofización o agotamiento de recursos. Finalmente, la interpretación integra los resultados, permitiendo extraer conclusiones coherentes con los objetivos planteados (Roesch et al., 2025).

Si bien la EIA y la LCA operan en niveles diferentes, existe un vínculo metodológico y conceptual entre ambas. La EIA se centra en proyectos concretos y contextos territoriales específicos, mientras que la LCA aborda productos o procesos en un marco sistémico global. Sin embargo, ambas comparten principios de identificación sistemática de interacciones, análisis de impactos y búsqueda de coherencia entre decisiones humanas y procesos naturales. La complementariedad de estos instrumentos ha llevado a que en algunos contextos se integren en marcos comunes de análisis, permitiendo vincular evaluaciones de proyectos con análisis de cadenas de valor y ciclos de vida.

La EIA se desarrolla en un plano normativo en el que los resultados del estudio tienen implicaciones jurídicas para la autorización de proyectos. Esto implica que la EIA no solo es un ejercicio técnico, sino también un proceso institucional regulado por leyes y políticas públicas. Su aplicación requiere la elaboración de estudios técnicos detallados, conocidos como estudios de impacto ambiental, que son sometidos a revisión por autoridades competentes (Fan et al., 2022). El carácter normativo de la EIA la convierte en un mecanismo de articulación entre ciencia, tecnología y derecho, reflejando cómo los resultados del análisis ambiental se integran en la gestión política y administrativa.

En contraste, la LCA opera en un plano voluntario en gran parte de sus aplicaciones, aunque progresivamente se ha convertido en una herramienta vinculada a la certificación ambiental, la ecoetiquetación y la gestión empresarial. Empresas, instituciones y organismos utilizan la LCA como base para demostrar el desempeño ambiental de sus productos, cumplir con normativas internacionales o acceder a mercados que valoran criterios ambientales. La normalización internacional de la LCA por parte de la ISO ha facilitado su adopción global, asegurando comparabilidad y coherencia metodológica en los estudios realizados (Kumar et al., 2023).

La aplicación de la LCA permite comprender la complejidad de los impactos que no se limitan a un lugar o a una etapa particular del ciclo de vida. Un producto puede tener bajas emisiones en la fase de uso, pero altos impactos en la fase de extracción de materias primas; o bien, una mejora tecnológica en la producción puede generar efectos no deseados en la disposición final. Este tipo de análisis sistémico proporciona una visión amplia que evita traslados de impacto entre etapas o regiones geográficas, lo cual resulta esencial para la planificación estratégica en sostenibilidad.

La EIA y la LCA también difieren en su escala temporal. Mientras que la EIA se enfoca en el horizonte temporal de un proyecto determinado, la LCA considera un marco más amplio que abarca todo el ciclo de vida del producto o proceso, incluso proyectando escenarios de disposición futura. Esta diferencia temporal resalta cómo la EIA busca controlar impactos inmediatos, mientras que la LCA procura capturar efectos acumulativos y de largo plazo en sistemas globales (Nemecek et al., 2024).

Ambas metodologías comparten la necesidad de contar con información confiable y detallada. En la EIA, esta información se centra en la descripción del medio físico, biológico y social del área de influencia del proyecto, así como en las características técnicas de la actividad propuesta. En la LCA, la información se organiza en inventarios de flujos, lo cual requiere bases de datos específicas que recopilen datos de procesos productivos a nivel local y global. La calidad, disponibilidad y coherencia de la información constituyen aspectos determinantes en la validez de los resultados obtenidos por ambos métodos.

En términos epistemológicos, la EIA se enmarca en una perspectiva de evaluación ex ante orientada a la prevención, mientras que la LCA se fundamenta en un análisis comparativo que permite examinar alternativas en función de su desempeño ambiental a lo largo del tiempo. Este contraste metodológico no implica oposición, sino

complementariedad, ya que ambos enfoques enriquecen la capacidad de análisis y decisión en distintos niveles.

El desarrollo de la EIA y la LCA refleja también la evolución de los paradigmas de gestión ambiental. La EIA surgió en un contexto de creciente preocupación por los impactos locales de proyectos de gran envergadura, como represas, carreteras o explotaciones mineras (Cheela et al., 2021). La LCA, en cambio, emergió en el ámbito industrial como respuesta a la necesidad de evaluar de manera integral los efectos ambientales de productos en mercados globales. Ambas herramientas, aunque con orígenes distintos, convergen en el paradigma actual de sostenibilidad, que demanda considerar simultáneamente impactos locales y globales, inmediatos y acumulativos, específicos y sistémicos.

La investigación científica y la innovación tecnológica continúan ampliando las capacidades de la EIA y la LCA. En el caso de la EIA, se incorporan técnicas de modelización, sistemas de información geográfica, imágenes satelitales y metodologías de participación social que enriquecen el análisis de impactos. En el caso de la LCA, se desarrollan métodos de evaluación de nuevas categorías de impacto, como toxicidad humana, impactos sobre biodiversidad o huella hídrica (Zhang et al., 2021). Estos avances permiten que ambas herramientas se mantengan actualizadas frente a la complejidad creciente de las interacciones entre actividades humanas y sistemas naturales.

2.2. Eco-diseño, eficiencia energética y economía circular.

El eco-diseño, la eficiencia energética y la economía circular constituyen tres enfoques conceptuales y metodológicos que han cobrado una relevancia creciente en el marco de la ingeniería sostenible y la gestión ambiental contemporánea. Estos enfoques se articulan entre sí bajo una lógica sistémica que busca integrar principios ecológicos en los procesos de diseño, producción y consumo, con el propósito de reorganizar la relación entre sistemas humanos y sistemas naturales. En conjunto, conforman una base metodológica y práctica que orienta la transformación de patrones productivos y de consumo hacia esquemas que consideran de manera explícita la interdependencia entre economía, sociedad y ambiente (Barkhausen et al., 2022).

El eco-diseño se entiende como el proceso de incorporación de criterios ambientales en la etapa de concepción y desarrollo de productos, servicios y sistemas. Esta aproximación reconoce que la mayor parte de los impactos ambientales se determinan en las fases iniciales del diseño, cuando se definen aspectos como los materiales a utilizar, la tecnología de producción, la durabilidad del producto y las posibilidades de reutilización o reciclaje. Desde esta perspectiva, el diseño no se limita a aspectos estéticos o funcionales, sino que incluye la consideración sistemática de variables ambientales a lo largo del ciclo de vida del producto. El eco-diseño se apoya en metodologías como el análisis de ciclo de vida, que permite cuantificar impactos potenciales y orientar decisiones de selección de materiales, procesos y configuraciones técnicas.

La práctica del eco-diseño se ha consolidado mediante marcos normativos y técnicos estandarizados, como las directrices de la ISO 14006, que establece principios para la integración del eco-diseño en los sistemas de gestión ambiental de las organizaciones. Estos marcos ofrecen lineamientos para que el diseño sea concebido

como una herramienta estratégica que conecta la innovación tecnológica con los objetivos de sostenibilidad. En este contexto, la ingeniería cumple un rol esencial, ya que los profesionales del área poseen las competencias técnicas necesarias para traducir principios abstractos de sostenibilidad en decisiones concretas de diseño y desarrollo (Krämer, 2024).

La eficiencia energética, por su parte, constituye un principio técnico y organizativo orientado a optimizar la relación entre el consumo de energía y los resultados obtenidos en un proceso, sistema o producto. Se trata de una noción cuantificable que busca reducir el uso de energía requerida para alcanzar un nivel de servicio o producción determinado, minimizando simultáneamente las pérdidas asociadas a la transformación, transmisión y utilización de la energía. En la ingeniería, la eficiencia energética se aplica en múltiples ámbitos: desde el diseño de edificios y sistemas de transporte, hasta la optimización de procesos industriales y la gestión de redes eléctricas.

El concepto de eficiencia energética se fundamenta en la termodinámica, particularmente en la comprensión de los procesos de conversión de energía y en la identificación de irreversibilidades que conducen a pérdidas. La ingeniería energética, a través de disciplinas como la termotecnia, la electrotecnia y la ingeniería de control, ha desarrollado metodologías de evaluación y herramientas de diseño que permiten cuantificar y mejorar los niveles de eficiencia. Entre estas herramientas se encuentran los balances energéticos, las auditorías energéticas y la modelización computacional de procesos, que ofrecen información precisa sobre el comportamiento energético de sistemas complejos (Patra, 2021).

La eficiencia energética adquiere relevancia en la medida en que la energía constituye el fundamento físico del funcionamiento de las sociedades humanas. La disponibilidad y gestión de la energía condicionan la producción económica, el transporte,

la comunicación y la vida cotidiana en general. En este sentido, optimizar su uso se traduce en un criterio de sostenibilidad técnica que busca reducir presiones sobre los sistemas naturales asociados a la generación de energía, al tiempo que promueve sistemas socioeconómicos más estables. La ingeniería, en este ámbito, se convierte en un agente clave en la búsqueda de sistemas energéticos integrados y adaptados a contextos locales y globales.

La economía circular se presenta como un paradigma que reconfigura la manera en que se conciben los ciclos de producción y consumo en las sociedades industriales. Frente al modelo lineal tradicional, caracterizado por la secuencia de extracción, producción, consumo y disposición, la economía circular propone una lógica regenerativa que busca mantener los materiales y recursos en uso durante el mayor tiempo posible, cerrando los ciclos mediante la reutilización, el reciclaje, la reparación y la regeneración (Van Doorsselaer, 2022). Este enfoque parte de la premisa de que los sistemas humanos deben organizarse de manera análoga a los sistemas naturales, donde los residuos de un proceso se convierten en insumos de otro y donde los ciclos de materia y energía se mantienen en equilibrio dinámico.

Desde el punto de vista metodológico, la economía circular integra instrumentos de gestión ambiental, diseño de sistemas industriales y planificación territorial. Su aplicación requiere la identificación de flujos de materiales y energía en los distintos niveles del sistema socioeconómico, así como la implementación de estrategias que permitan cerrar dichos flujos. Entre estas estrategias se encuentran el diseño para la durabilidad, la modularidad y la reparación; la valorización energética de residuos; la creación de simbiosis industriales; y la integración de cadenas de suministro que prioricen el uso eficiente de recursos. La ingeniería industrial, química, de materiales y ambiental desempeña un rol central en la materialización de este paradigma, ya que aporta el

conocimiento técnico necesario para rediseñar procesos productivos y logísticos bajo criterios circulares (Polverini, 2021).

El eco-diseño, la eficiencia energética y la economía circular no deben considerarse enfoques aislados, sino componentes interrelacionados de un marco integrado de sostenibilidad. El eco-diseño proporciona la base para que los productos y servicios sean concebidos considerando su ciclo de vida completo, lo cual facilita la implementación de estrategias circulares de reutilización y reciclaje. La eficiencia energética se integra como un principio transversal que atraviesa tanto las fases de producción como de uso y disposición, reduciendo la intensidad energética de los sistemas técnicos. Finalmente, la economía circular ofrece la lógica macro que organiza la relación entre producción, consumo y regeneración de recursos, asegurando que los esfuerzos de diseño y eficiencia se traduzcan en cambios estructurales en los sistemas socioeconómicos.

La investigación científica y tecnológica ha desarrollado diversas herramientas que facilitan la integración de estos tres enfoques. En el campo del eco-diseño, se utilizan softwares especializados de modelado y simulación que permiten prever el comportamiento ambiental de diferentes alternativas de diseño (Patra et al., 2022). En la eficiencia energética, se aplican tecnologías de sensores y sistemas de control que monitorizan en tiempo real los consumos y permiten ajustes dinámicos. En la economía circular, se desarrollan indicadores como la tasa de circularidad de materiales o la huella de recursos, que permiten medir el grado de implementación del paradigma. Estas herramientas refuerzan la capacidad de la ingeniería para diseñar y gestionar sistemas complejos en coherencia con principios de sostenibilidad.

La economía circular ha sido incorporada en estrategias nacionales y regionales que buscan reorganizar los sistemas productivos y de gestión de residuos en función de

ciclos cerrados de materiales. Este entramado normativo refleja cómo los principios técnicos desarrollados por la ingeniería se integran en marcos institucionales que orientan el comportamiento de empresas, consumidores y gobiernos.

En el ámbito educativo, el eco-diseño, la eficiencia energética y la economía circular se han incorporado progresivamente en los planes de estudio de la ingeniería y disciplinas afines (Timm et al., 2023). La formación de profesionales con competencias en estos campos constituye un elemento esencial para garantizar su aplicación práctica en diversos sectores productivos y de servicios. La enseñanza de estos enfoques implica no solo la transmisión de conocimientos técnicos, sino también la incorporación de una visión sistémica que permita comprender las interdependencias entre procesos naturales y procesos humanos.

La dimensión ética también resulta central en la implementación de estos enfoques. Concebir productos, sistemas energéticos y modelos económicos bajo principios de sostenibilidad supone asumir una responsabilidad intergeneracional respecto al uso de los recursos naturales y a la preservación de los ecosistemas. En este sentido, la ingeniería no solo actúa como disciplina técnica, sino también como práctica social que debe orientarse por valores de equidad, precaución y responsabilidad ambiental (Rodríguez Martín et al., 2022).

En síntesis, el eco-diseño, la eficiencia energética y la economía circular representan pilares conceptuales y metodológicos de la ingeniería sostenible contemporánea. Estos enfoques, interrelacionados y complementarios, permiten articular soluciones técnicas y organizativas que reconfiguran la relación entre sociedad, economía y ambiente.

2.3. Tecnologías limpias y soluciones basadas en la naturaleza (SbN).

Las tecnologías limpias y las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) representan dos enfoques complementarios dentro del marco de la ingeniería sostenible y la gestión ambiental contemporánea. Ambas nociones se han consolidado como categorías analíticas y operativas que buscan reorganizar las interacciones entre los sistemas humanos y los ecosistemas, proponiendo caminos diferenciados pero convergentes hacia la sostenibilidad. Mientras que las tecnologías limpias se centran en la innovación técnica orientada a minimizar impactos y optimizar procesos, las soluciones basadas en la naturaleza se fundamentan en la capacidad de los ecosistemas y procesos naturales para ofrecer respuestas eficaces y sostenibles a problemáticas ambientales y sociales (Ernwein & Palmer, 2025). La articulación entre ambas perspectivas refleja un movimiento interdisciplinario en el que confluyen ciencias naturales, ingeniería, economía ecológica y políticas públicas.

Las tecnologías limpias, conocidas también como tecnologías ambientales o tecnologías verdes, abarcan un conjunto de innovaciones técnicas que buscan reducir la generación de contaminantes, optimizar el uso de recursos naturales y mejorar la eficiencia en procesos productivos y de consumo. Estas tecnologías se distinguen por su orientación hacia la prevención, más que a la corrección, al integrar criterios ambientales desde la fase de diseño. La noción de tecnologías limpias engloba tanto procesos industriales como productos, sistemas energéticos, métodos de tratamiento de residuos y técnicas de monitoreo ambiental. Su fundamento conceptual se encuentra en la idea de que la ingeniería puede contribuir a reorganizar las bases materiales de la sociedad mediante la introducción de procesos más eficientes y menos intensivos en recursos y emisiones.

En el ámbito energético, las tecnologías limpias incluyen sistemas de generación renovable como la solar fotovoltaica, la eólica, la hidroeléctrica de baja escala, la geotérmica y la biomasa. Estas tecnologías buscan transformar las matrices energéticas al reducir la dependencia de fuentes fósiles, integrando soluciones basadas en flujos energéticos renovables y abundantes. En el campo de la industria, las tecnologías limpias se manifiestan en procesos de producción más limpios, caracterizados por el uso eficiente del agua y la energía, la minimización de residuos y la sustitución de insumos peligrosos. En el área del transporte, se expresan en el desarrollo de vehículos eléctricos, sistemas de transporte público de bajas emisiones y redes de movilidad integradas.

El ámbito de los residuos constituye otro campo central de aplicación de las tecnologías limpias (Torrens et al., 2025). Aquí se incluyen sistemas de reciclaje avanzado, valorización energética de residuos, compostaje y tecnologías de depuración de aguas. Estas innovaciones no solo buscan reducir la presión sobre los ecosistemas, sino también reincorporar materiales y recursos en ciclos productivos, lo cual conecta directamente con los principios de la economía circular. La ingeniería ambiental, química e industrial desempeña un papel fundamental en el diseño, implementación y optimización de estas soluciones técnicas.

Las tecnologías limpias también han avanzado en el terreno del monitoreo y la gestión de información ambiental. Sistemas de sensores, redes de monitoreo en tiempo real, tecnologías de teledetección y plataformas digitales permiten recopilar datos detallados sobre calidad del aire, agua, suelos y biodiversidad. Esta información resulta esencial para la gestión adaptativa, ya que posibilita ajustar decisiones de manera dinámica frente a cambios en las condiciones ambientales. La digitalización, la inteligencia artificial y el análisis de grandes volúmenes de datos refuerzan el papel de

las tecnologías limpias en la gestión ambiental contemporánea, al mejorar la capacidad de predicción y control.

En contraste, las soluciones basadas en la naturaleza se fundamentan en el aprovechamiento de las funciones y procesos de los ecosistemas como respuesta a desafíos ambientales, sociales y económicos (Valdes et al., 2025). El concepto, promovido inicialmente por organismos internacionales como la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) y la Comisión Europea, reconoce que los ecosistemas proporcionan servicios fundamentales que pueden utilizarse de manera intencional para abordar problemas como la regulación hídrica, la adaptación al cambio climático, la seguridad alimentaria o la salud humana.

Las SbN se caracterizan por apoyarse en la biodiversidad y en los procesos ecológicos como infraestructura viva que contribuye a generar beneficios múltiples. Ejemplos paradigmáticos de SbN incluyen la restauración de humedales para el control de inundaciones, la reforestación de cuencas para mejorar la calidad y disponibilidad de agua, los techos y muros verdes en entornos urbanos para regular la temperatura y mejorar la calidad del aire, y los sistemas agroforestales que integran producción agrícola con conservación de biodiversidad. Estas soluciones no se limitan a reproducir procesos naturales, sino que los potencian mediante intervenciones planificadas y gestionadas en coherencia con principios ecológicos (Asamoah et al., 2024).

En el ámbito urbano, las SbN han cobrado especial relevancia en la planificación de ciudades resilientes. Estrategias como la creación de corredores verdes, parques urbanos multifuncionales y sistemas de drenaje sostenible integran infraestructura ecológica en el diseño de entornos construidos. Estas prácticas no solo generan beneficios ambientales, sino que también refuerzan aspectos sociales y culturales, como el acceso a espacios públicos y la integración comunitaria. En zonas rurales, las SbN se materializan

en prácticas agrícolas sostenibles, restauración de ecosistemas degradados y conservación de servicios ecosistémicos que sustentan la producción y la seguridad alimentaria.

La comparación entre tecnologías limpias y SbN revela diferencias en sus fundamentos ontológicos y epistemológicos (Alshehri et al., 2023). Mientras las primeras parten de la innovación técnica desarrollada por la ingeniería y la ciencia aplicada, las segundas se basan en el reconocimiento de las capacidades inherentes de los ecosistemas. No obstante, ambas convergen en la búsqueda de soluciones sostenibles y complementarias. En muchos casos, la implementación más eficaz se alcanza mediante la combinación de ambas perspectivas. Por ejemplo, los sistemas de tratamiento de aguas pueden integrar tecnologías limpias de filtración avanzada con SbN basadas en humedales artificiales, generando sinergias que mejoran el desempeño y la resiliencia del sistema.

Desde el punto de vista normativo, tanto las tecnologías limpias como las SbN se han incorporado en marcos internacionales y nacionales de política ambiental. Organismos multilaterales promueven su adopción mediante programas de financiamiento, estándares técnicos y directrices de implementación. La inclusión de SbN en acuerdos internacionales sobre cambio climático, biodiversidad y desarrollo sostenible refleja el reconocimiento de la naturaleza como un componente activo de las estrategias globales de sostenibilidad. De manera similar, las tecnologías limpias han sido integradas en normativas de eficiencia energética, gestión de residuos, calidad del aire y reducción de emisiones (Alshehri et al., 2023).

En el plano científico, ambas perspectivas se benefician del avance de metodologías de evaluación que permiten medir su efectividad y sus impactos. En el caso de las tecnologías limpias, se aplican herramientas como el análisis de ciclo de vida, la contabilidad de carbono y los indicadores de ecoeficiencia. Para las SbN, se desarrollan

metodologías de valoración de servicios ecosistémicos, modelización de escenarios ecológicos y análisis de co-beneficios sociales y culturales. Estas metodologías fortalecen la base empírica que sustenta la toma de decisiones en torno a la implementación de estas soluciones.

El carácter interdisciplinario constituye un rasgo común de ambos enfoques. La implementación de tecnologías limpias requiere la interacción de la ingeniería con disciplinas como la economía, el derecho y la gestión empresarial. Las SbN, por su parte, integran ecología, ciencias sociales, planificación territorial y políticas públicas. Este carácter interdisciplinario refleja la necesidad de superar enfoques sectoriales para abordar la complejidad de las interacciones entre sociedad y ambiente (Ahmed et al., 2024).

Un aspecto esencial en la integración de tecnologías limpias y SbN es la escala espacial y temporal de su aplicación. Las tecnologías limpias suelen enfocarse en procesos específicos y escalas industriales o urbanas, mientras que las SbN operan frecuentemente a escalas territoriales y ecosistémicas (Pereira et al., 2023). Sin embargo, su complementariedad permite diseñar soluciones multiescalares que articulan innovación técnica con restauración ecológica. En este sentido, la ingeniería sostenible se configura como un espacio de convergencia donde ambas perspectivas se integran de manera sinérgica.

En síntesis, las tecnologías limpias y las soluciones basadas en la naturaleza representan dos pilares fundamentales de la gestión ambiental y la ingeniería sostenible contemporánea. Las primeras aportan innovación técnica orientada a la reducción de impactos y a la optimización de procesos, mientras que las segundas movilizan las capacidades de los ecosistemas para generar respuestas integrales a desafíos ambientales y sociales.

2.4. Digitalización y sostenibilidad: Big Data, IoT y simulaciones aplicadas a la ingeniería ambiental.

La digitalización ha emergido en las últimas décadas como un proceso transformador que atraviesa de manera transversal todos los ámbitos de la actividad humana, desde la economía y la educación hasta la investigación científica y la gestión ambiental. En este contexto, la incorporación de tecnologías digitales a la ingeniería ambiental representa un cambio paradigmático en la forma de comprender, modelar y gestionar los sistemas socioecológicos. El desarrollo de herramientas como Big Data, el Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) y las simulaciones computacionales avanzadas permite generar nuevas capacidades analíticas, operativas y predictivas que refuerzan los principios de sostenibilidad al ofrecer una visión más integrada, dinámica y basada en evidencia (Saeed, 2021).

La noción de Big Data se refiere al procesamiento y análisis de grandes volúmenes de información caracterizados por su magnitud, velocidad y variedad. En el campo de la ingeniería ambiental, la generación de datos proviene de múltiples fuentes, como estaciones meteorológicas, sensores de calidad del aire y del agua, sistemas satelitales, registros de consumo energético y flujos de transporte urbano. El análisis de Big Data permite identificar patrones, correlaciones y tendencias que serían indetectables mediante métodos tradicionales de recolección y procesamiento de información. Esta capacidad se traduce en un conocimiento más profundo de las dinámicas ambientales, posibilitando una gestión más precisa y adaptativa de los recursos.

El Internet de las Cosas constituye un segundo pilar de la digitalización aplicada a la sostenibilidad. Este concepto se refiere a la interconexión de dispositivos físicos que recopilan, transmiten y procesan información en tiempo real mediante redes de comunicación digital. En la ingeniería ambiental, los sistemas IoT se aplican en ámbitos

como la gestión hídrica, donde sensores instalados en redes de distribución permiten monitorear caudales, detectar fugas y controlar la calidad del agua. En el sector energético, dispositivos inteligentes regulan el consumo eléctrico, optimizan la operación de redes y facilitan la integración de fuentes renovables intermitentes. En la gestión de residuos, contenedores equipados con sensores comunican su nivel de llenado, optimizando rutas de recolección y reduciendo costos logísticos (Bibri et al., 2023).

La potencia de las tecnologías IoT reside en su capacidad para generar datos continuos y descentralizados que reflejan de manera directa las condiciones del entorno. Este flujo constante de información alimenta plataformas de análisis basadas en Big Data, creando sistemas de retroalimentación que permiten ajustar las decisiones de manera dinámica. La interacción entre IoT y Big Data genera un ecosistema digital en el que los sistemas ambientales y técnicos pueden ser gestionados con mayor precisión y resiliencia.

Las simulaciones computacionales constituyen un tercer componente de la digitalización aplicada a la ingeniería ambiental (Rane, 2023). Estas herramientas permiten modelar procesos complejos mediante representaciones matemáticas y computacionales que reproducen escenarios de interacción entre variables ambientales, sociales y técnicas. Los modelos de simulación abarcan desde dinámicas hidrológicas y climáticas hasta procesos urbanos y flujos de materiales en sistemas industriales. En la práctica, las simulaciones facilitan la evaluación de alternativas de gestión, el análisis de riesgos y la planificación de políticas bajo condiciones de incertidumbre.

En el campo del agua, las simulaciones permiten modelar el comportamiento de cuencas hidrográficas, prever sequías o inundaciones y diseñar infraestructuras de almacenamiento y distribución adaptadas a escenarios climáticos futuros. En la energía, los modelos de simulación proyectan la demanda, evalúan la integración de fuentes renovables y diseñan estrategias de almacenamiento. En la gestión de residuos, las

simulaciones permiten optimizar rutas de recolección, analizar escenarios de valorización y evaluar la capacidad de vertederos. En todos los casos, las simulaciones ofrecen un marco de apoyo para la toma de decisiones basada en evidencia y con capacidad de anticipación.

La convergencia entre Big Data, IoT y simulaciones redefine las capacidades de la ingeniería ambiental. En lugar de operar sobre datos limitados y modelos estáticos, los sistemas digitales permiten trabajar con información en tiempo real, actualizada y proveniente de múltiples escalas (Chu et al., 2021). Este salto cualitativo posibilita un enfoque de gestión adaptativa, en el que las políticas y estrategias pueden ajustarse continuamente según las condiciones cambiantes del entorno. Asimismo, facilita la incorporación de la incertidumbre y la variabilidad como elementos constitutivos de los modelos de gestión, mejorando la capacidad de respuesta frente a fenómenos ambientales complejos.

Un aspecto fundamental en la aplicación de estas tecnologías digitales es la integración multiescalar. Los datos obtenidos mediante sensores IoT reflejan condiciones locales específicas, como la calidad del aire en un barrio o el nivel de un tanque de agua. Estos datos, al ser procesados mediante herramientas de Big Data, se integran en escalas regionales y nacionales, permitiendo identificar patrones de mayor amplitud. Posteriormente, las simulaciones computacionales utilizan estos datos para proyectar escenarios a futuro, generando una visión holística que abarca desde lo local hasta lo global (Matheri et al., 2022). La digitalización, en este sentido, contribuye a superar la fragmentación en la gestión ambiental, promoviendo una articulación de escalas espaciales y temporales.

El uso de Big Data, IoT y simulaciones también refuerza la capacidad de la ingeniería ambiental para abordar la complejidad. Los sistemas socioecológicos se

caracterizan por su dinamismo, su interdependencia y su susceptibilidad a retroalimentaciones no lineales. Los métodos tradicionales de análisis tienden a simplificar estas dinámicas, lo que puede limitar la capacidad de predicción y gestión. La digitalización, en cambio, permite representar mejor la complejidad mediante la integración de múltiples fuentes de información y la modelización de interacciones dinámicas. Esta capacidad favorece el diseño de estrategias más coherentes con la naturaleza sistémica de los problemas ambientales.

En el ámbito urbano, la digitalización ha dado lugar al concepto de ciudades inteligentes, en las que los sistemas de movilidad, energía, agua y residuos son gestionados mediante plataformas digitales interconectadas (Tseng et al., 2021). La ingeniería ambiental participa en estos procesos diseñando infraestructuras inteligentes capaces de optimizar recursos y reducir impactos. En entornos rurales, las tecnologías digitales se aplican en la agricultura de precisión, mediante sensores que regulan el riego y el uso de fertilizantes, reduciendo el consumo de agua y el impacto sobre suelos y ecosistemas. En la gestión de ecosistemas, sistemas de monitoreo remoto permiten seguir la evolución de la biodiversidad, detectar cambios en la cobertura forestal y anticipar riesgos de incendios.

El desarrollo de estas tecnologías digitales también implica transformaciones institucionales y metodológicas. La gestión de datos a gran escala requiere infraestructuras robustas de almacenamiento y procesamiento, así como protocolos de interoperabilidad que permitan integrar información proveniente de diferentes fuentes. Asimismo, demanda competencias técnicas en el manejo de algoritmos de análisis, inteligencia artificial y modelización computacional (Andronie et al., 2021). En este sentido, la ingeniería ambiental se redefine como un campo interdisciplinario en el que

confluyen competencias de ciencias naturales, ingeniería tradicional y ciencias de la computación.

En el plano normativo, la digitalización se ha incorporado progresivamente en los marcos regulatorios de la gestión ambiental. Normas internacionales y nacionales establecen estándares para el monitoreo digital de emisiones, la medición inteligente del consumo energético y la trazabilidad de materiales y residuos. La integración de estas tecnologías en los sistemas de gestión ambiental permite cumplir con objetivos regulatorios de manera más precisa y verificable (Borowski, 2021). Al mismo tiempo, fortalece los mecanismos de reporte, auditoría y certificación, consolidando la confianza en los procesos de gestión ambiental.

En síntesis, la digitalización aplicada a la ingeniería ambiental, mediante herramientas como Big Data, IoT y simulaciones, representa una transformación profunda en la manera de abordar la sostenibilidad. Estas tecnologías permiten recopilar información masiva y en tiempo real, interconectar dispositivos y sistemas, y modelar escenarios complejos, fortaleciendo la capacidad de anticipación y adaptación de las sociedades. La articulación entre estas herramientas genera un ecosistema digital que integra múltiples escalas, actores y procesos, ofreciendo una visión sistémica y dinámica de las interacciones entre medio ambiente, sociedad y economía. En este marco, la ingeniería ambiental se configura como una disciplina estratégica que combina la innovación digital con la responsabilidad ecológica, contribuyendo a la construcción de sociedades sostenibles en un contexto global caracterizado por la complejidad y el cambio constante.

Capítulo III. Aplicaciones y casos prácticos de la ingeniería sostenible

3.1. Construcción sostenible y eco-materiales.

La construcción constituye uno de los sectores de mayor relevancia en términos económicos, sociales y ambientales. Se trata de una actividad que estructura los espacios habitables, productivos y de movilidad de la sociedad, al mismo tiempo que representa uno de los mayores consumidores de recursos naturales y generadores de emisiones a nivel global. La búsqueda de modelos de desarrollo sostenible ha situado al sector de la construcción en el centro del debate, impulsando la emergencia de conceptos como la construcción sostenible y los eco-materiales. Estos enfoques buscan integrar principios de sostenibilidad en el ciclo de vida de edificaciones e infraestructuras, desde la extracción de materias primas hasta su demolición o reutilización, articulando criterios ambientales, sociales y técnicos (Sonia & Meena, 2024).

La construcción sostenible puede definirse como aquella que incorpora en sus procesos de planificación, diseño, ejecución, operación y mantenimiento criterios que reducen los impactos negativos sobre el medio ambiente y que optimizan el uso de recursos, al mismo tiempo que generan entornos saludables y funcionales para los usuarios. Este enfoque se fundamenta en la integración de herramientas de evaluación del ciclo de vida, certificaciones de sostenibilidad, innovaciones tecnológicas y la utilización de eco-materiales. Se concibe así a la construcción no como una actividad aislada, sino como parte de sistemas socioecológicos en los que interactúan flujos de materiales, energía y servicios ecosistémicos.

Uno de los pilares de la construcción sostenible es la eficiencia en el uso de recursos. Las edificaciones tradicionales demandan grandes volúmenes de materiales, energía y agua, tanto en su fase de construcción como en su etapa de operación. Los modelos sostenibles buscan reducir estas demandas mediante el diseño bioclimático, la

eficiencia energética, el uso de tecnologías de ahorro de agua y la optimización de materiales. La arquitectura bioclimática, por ejemplo, incorpora la orientación, la ventilación natural, la inercia térmica y la captación de luz natural como elementos que disminuyen la necesidad de sistemas mecánicos de climatización e iluminación. Estos principios, combinados con tecnologías modernas de aislamiento y control digital, permiten que las edificaciones funcionen con menor intensidad energética y con menor huella ambiental (Kumar, 2024).

La sostenibilidad en la construcción también se refleja en la planificación territorial y urbana. Las ciudades concentran gran parte de la demanda de infraestructura, y su diseño influye directamente en los patrones de movilidad, consumo energético y generación de residuos. La planificación urbana sostenible promueve densidades equilibradas, integración de usos de suelo, acceso a transporte público eficiente y espacios verdes, con el fin de reducir los impactos de la urbanización descontrolada. La ingeniería civil y la arquitectura desempeñan aquí un papel esencial al articular criterios de habitabilidad con principios de sostenibilidad, integrando infraestructura gris con infraestructura verde.

Un componente clave en este enfoque es la selección de materiales de construcción. Los materiales tradicionales, como el hormigón y el acero, aunque ofrecen ventajas técnicas en términos de resistencia y durabilidad, presentan elevados impactos ambientales asociados a su producción, como emisiones de dióxido de carbono, consumo energético intensivo y extracción masiva de recursos (Soni et al., 2024). Frente a este contexto, han surgido los eco-materiales, definidos como materiales que reducen impactos ambientales en alguna fase de su ciclo de vida, ya sea mediante la utilización de recursos renovables, reciclados o de bajo impacto, o mediante la mejora en su durabilidad y capacidad de reutilización.

Los eco-materiales pueden clasificarse en varias categorías. Una primera categoría está conformada por materiales naturales renovables, como la madera certificada, el bambú, la tierra cruda estabilizada y fibras vegetales. Estos materiales poseen menor huella de carbono y se integran en procesos constructivos tradicionales y modernos. La madera, por ejemplo, no solo actúa como material estructural, sino que también funciona como sumidero de carbono durante su vida útil. Una segunda categoría corresponde a materiales reciclados o reutilizados, como el hormigón reciclado, el acero recuperado, el vidrio reciclado y los plásticos reprocesados (Al Shdifat et al., 2023). Estos materiales prolongan el ciclo de vida de los recursos y reducen la presión sobre fuentes vírgenes. Una tercera categoría incluye materiales innovadores de bajo impacto, como cementos con adiciones minerales, paneles de aislamiento a base de fibras recicladas o compuestos biotecnológicos.

El diseño de eco-materiales se apoya en metodologías de evaluación científica, como el análisis de ciclo de vida y la huella de carbono. Estas herramientas permiten comparar diferentes alternativas en función de su impacto global, considerando etapas de extracción, transporte, transformación, uso y disposición final. Los resultados de estas evaluaciones guían las decisiones de ingenieros y arquitectos, quienes seleccionan materiales no solo por criterios de resistencia y costo, sino también por su coherencia con objetivos de sostenibilidad.

La aplicación de eco-materiales y principios de construcción sostenible se ha consolidado mediante sistemas de certificación que estandarizan y verifican el cumplimiento de criterios ambientales y de eficiencia (Luca et al., 2023). Certificaciones como LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) o EDGE (Excellence in Design for Greater Efficiencies) establecen indicadores en áreas como eficiencia

energética, uso de agua, selección de materiales, gestión de residuos y calidad ambiental interior. Estos sistemas generan marcos de referencia internacionales que promueven la adopción de prácticas sostenibles en el sector de la construcción, facilitando la comparabilidad y la difusión de buenas prácticas.

Un aspecto central en la construcción sostenible es la gestión de residuos de construcción y demolición. Este flujo representa uno de los mayores volúmenes de residuos a nivel global, y su manejo constituye un desafío para los sistemas de gestión ambiental. Los modelos de construcción sostenible integran estrategias de prevención, separación en origen, reutilización de materiales y reciclaje, buscando minimizar la disposición en vertederos. Tecnologías como la trituración de escombros para producir áridos reciclados o la reutilización de componentes estructurales se han convertido en prácticas habituales en el marco de proyectos sostenibles.

La construcción sostenible y los eco-materiales también se vinculan con procesos de innovación tecnológica (Barikdar et al., 2022). El desarrollo de impresoras 3D para construcción, por ejemplo, abre posibilidades para la utilización de mezclas más eficientes y adaptadas a necesidades específicas, reduciendo residuos y optimizando el uso de recursos. La nanotecnología, por su parte, permite mejorar propiedades de materiales tradicionales, como la resistencia, durabilidad y capacidad de aislamiento, con menor consumo de materia prima. Estas innovaciones amplían el repertorio de soluciones disponibles para diseñar edificaciones coherentes con principios de sostenibilidad.

En el ámbito de la infraestructura pública, la construcción sostenible implica diseñar carreteras, puentes, presas y sistemas de transporte que integren criterios ambientales y sociales en todas sus fases. El uso de pavimentos reciclados, sistemas de drenaje sostenible y materiales de bajo impacto forman parte de las estrategias implementadas en proyectos de gran escala. En el ámbito residencial, los proyectos de

vivienda sostenible incorporan desde materiales locales hasta tecnologías inteligentes de eficiencia energética, buscando crear entornos habitables que reduzcan costos de operación y mejoren la calidad ambiental interior (Saleh et al., 2023).

La relación entre construcción sostenible y eco-materiales se inserta en el marco más amplio de la economía circular. Este paradigma plantea la necesidad de cerrar ciclos materiales y energéticos, reduciendo al mínimo la extracción de recursos y la generación de residuos. En este sentido, los proyectos de construcción sostenible no solo incorporan eco-materiales, sino que también diseñan edificaciones y ciudades concebidas para facilitar la reutilización, el reciclaje y la adaptabilidad a lo largo del tiempo. La modularidad, la facilidad de desmontaje y la flexibilidad de los diseños constituyen estrategias orientadas a prolongar la vida útil de los materiales y a reducir la presión sobre los ecosistemas (Popescu et al., 2024).

Por tanto, la construcción sostenible y los eco-materiales representan un campo estratégico en la transición hacia sociedades más sostenibles. La construcción sostenible integra principios ambientales, sociales y técnicos en todo el ciclo de vida de edificaciones e infraestructuras, mientras que los eco-materiales ofrecen alternativas de bajo impacto que reconfiguran las bases materiales del sector. La convergencia entre ambos enfoques refleja un movimiento hacia la integración de innovación tecnológica, criterios ambientales y planificación territorial en el diseño de entornos construidos. La ingeniería, en este contexto, se constituye como un actor central en la implementación de soluciones que articulen habitabilidad, resiliencia y sostenibilidad, configurando así un sector de la construcción capaz de responder a las demandas contemporáneas de desarrollo responsable.

3.2. Movilidad y transporte de bajas emisiones.

El transporte constituye uno de los sectores estratégicos para la organización de las sociedades contemporáneas, pues posibilita la circulación de personas, bienes y servicios, articulando dinámicas económicas, sociales y culturales. Sin embargo, también representa una de las principales fuentes de consumo energético y de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial. La transición hacia modelos de movilidad y transporte de bajas emisiones se ha consolidado como un eje central en la construcción de sociedades sostenibles, integrando innovaciones tecnológicas, planificación urbana y transformaciones culturales (Ortega et al., 2021).

La movilidad de bajas emisiones puede definirse como el conjunto de sistemas, infraestructuras y tecnologías de transporte que reducen de manera significativa la generación de contaminantes atmosféricos y de gases de efecto invernadero a lo largo de su ciclo de vida. Este concepto abarca tanto la eficiencia en el uso de los recursos energéticos como la adopción de fuentes renovables, la reducción de la dependencia de combustibles fósiles y la implementación de estrategias de gestión que optimicen los desplazamientos. La movilidad sostenible y de bajas emisiones no se limita a la introducción de nuevas tecnologías, sino que implica una reorganización sistémica del transporte en su relación con la planificación territorial, los patrones de consumo y los estilos de vida (Manglano-Redondo et al., 2025).

Históricamente, el transporte se ha sustentado en la utilización de combustibles fósiles, especialmente desde la expansión del automóvil en el siglo XX. El motor de combustión interna permitió el desarrollo de redes viales extensas y de patrones urbanos dependientes del automóvil, lo cual impulsó el crecimiento económico, pero también generó elevados impactos ambientales. Las emisiones derivadas del transporte se han convertido en uno de los principales contribuyentes al cambio climático y a la

degradación de la calidad del aire en las ciudades. Ante este panorama, las políticas contemporáneas han orientado sus esfuerzos a la transformación de los sistemas de transporte hacia modelos menos intensivos en carbono.

En términos tecnológicos, el desarrollo de vehículos eléctricos representa uno de los avances más relevantes en el campo de la movilidad de bajas emisiones. Los automóviles eléctricos, junto con los híbridos enchufables y los vehículos impulsados por hidrógeno, constituyen alternativas que disminuyen de manera significativa las emisiones directas en comparación con los vehículos convencionales. Estos sistemas requieren, no obstante, de un suministro eléctrico basado en fuentes renovables para garantizar la reducción efectiva de emisiones en su ciclo de vida. La ingeniería desempeña un papel crucial en la optimización de baterías, en el desarrollo de sistemas de carga rápida y en la integración de redes inteligentes que permitan gestionar la demanda energética derivada de la electromovilidad (Małek, 2025).

El transporte público constituye otro pilar fundamental en la transición hacia la movilidad de bajas emisiones. Los sistemas de transporte masivo, como trenes, tranvías, autobuses eléctricos o de gas natural y sistemas de metro, permiten reducir de manera significativa las emisiones por pasajero en comparación con el transporte individual. La planificación de sistemas integrados de transporte, que combinan diferentes modos bajo criterios de eficiencia y accesibilidad, fortalece la capacidad de las ciudades para disminuir su huella de carbono y mejorar la calidad de vida urbana.

La movilidad activa, basada en modos no motorizados como caminar y el uso de la bicicleta, también se encuentra en el centro de las estrategias de bajas emisiones. Estos modos de transporte, además de no generar emisiones, contribuyen a la salud pública y a la cohesión social. La creación de infraestructura peatonal y ciclista, junto con políticas de seguridad vial y programas de incentivo, refuerzan la viabilidad de la movilidad activa

como alternativa cotidiana. En las ciudades que han priorizado la movilidad activa se observa una disminución significativa en la dependencia del automóvil, lo cual se traduce en reducciones importantes de emisiones y en una mayor resiliencia de los sistemas urbanos (Kozera et al., 2024).

La logística y el transporte de mercancías representan otro componente crítico del sector. El crecimiento del comercio internacional y del comercio electrónico ha intensificado la demanda de transporte de carga, con impactos directos sobre las emisiones globales. La movilidad de bajas emisiones en este ámbito se orienta a la optimización de rutas, al uso de combustibles alternativos como el gas natural licuado y el hidrógeno, a la electrificación de flotas urbanas de reparto y a la incorporación de tecnologías digitales para la gestión inteligente de cadenas logísticas (Thanatrakolsri & Sirithian, 2025). El transporte marítimo y aéreo, que concentran gran parte de las emisiones del sector, requieren innovaciones específicas, como el desarrollo de biocombustibles avanzados, aeronaves más eficientes y barcos propulsados por sistemas híbridos.

El vínculo entre movilidad y planificación territorial resulta fundamental. Las ciudades de baja densidad y expansión dispersa tienden a generar patrones de movilidad dependientes del automóvil, mientras que las ciudades compactas, con usos de suelo mixtos y acceso a transporte público eficiente, reducen la necesidad de desplazamientos motorizados. La planificación urbana sostenible integra principios de movilidad de bajas emisiones desde su concepción, orientando el crecimiento de la ciudad hacia modelos más equilibrados y accesibles. La ingeniería urbana y la arquitectura desempeñan un rol esencial en esta articulación, diseñando entornos que reduzcan la presión del transporte sobre los sistemas ambientales.

Las soluciones basadas en la digitalización constituyen un elemento transversal en la movilidad de bajas emisiones. Herramientas como el Big Data, el Internet de las Cosas y la inteligencia artificial permiten gestionar en tiempo real el tráfico, optimizar rutas de transporte público, coordinar sistemas de movilidad compartida y reducir tiempos de viaje. Estas tecnologías mejoran la eficiencia de los sistemas de transporte y reducen emisiones indirectas al evitar congestiones y desplazamientos innecesarios (De Vrij & Vanoutrive, 2022). La movilidad compartida, mediante plataformas digitales que facilitan el uso compartido de vehículos, bicicletas y scooters, se integra en este contexto como una estrategia complementaria que reduce el número de automóviles en circulación.

Los marcos normativos internacionales también han promovido la transición hacia la movilidad de bajas emisiones. Acuerdos globales sobre cambio climático, como el Acuerdo de París, han impulsado compromisos nacionales de reducción de emisiones en el sector transporte. Asimismo, organismos internacionales han establecido directrices para promover combustibles limpios, eficiencia vehicular y movilidad sostenible en las ciudades. Las normativas locales, como las zonas de bajas emisiones o las restricciones a vehículos contaminantes en centros urbanos, han demostrado ser instrumentos efectivos para acelerar la transformación de los patrones de movilidad (Bachanek et al., 2023).

En el plano social, la transición hacia la movilidad de bajas emisiones requiere de cambios culturales y de percepción. El automóvil privado ha sido históricamente símbolo de estatus y autonomía; sin embargo, las nuevas generaciones manifiestan mayor apertura hacia sistemas de movilidad compartida, transporte público y medios activos. Los procesos educativos y de sensibilización juegan un papel clave en la aceptación social de estos cambios, fomentando la valoración de alternativas que no solo son ambientalmente sostenibles, sino que también promueven la equidad en el acceso a la movilidad.

La movilidad y el transporte de bajas emisiones se encuentran estrechamente vinculados a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular al ODS 11, referido a ciudades y comunidades sostenibles, y al ODS 13, centrado en la acción por el clima. El transporte sostenible contribuye a reducir desigualdades, mejorar la salud pública, disminuir la contaminación atmosférica y mitigar el cambio climático, situándose en el núcleo de las estrategias de desarrollo a escala global.

La investigación científica y el desarrollo tecnológico continúan ampliando el horizonte de posibilidades en este campo (Lin & Nitivattananon, 2024). Avances en baterías de estado sólido, hidrógeno verde, sistemas autónomos de transporte y materiales ligeros para vehículos se perfilan como elementos clave en la configuración futura de la movilidad de bajas emisiones. Al mismo tiempo, la integración de modelos de simulación y de análisis de ciclo de vida permite evaluar de manera más precisa el impacto de diferentes alternativas tecnológicas y organizativas.

Así pues, la movilidad y el transporte de bajas emisiones representan un componente esencial de la transición hacia sociedades sostenibles. La combinación de tecnologías limpias, planificación urbana, digitalización, políticas públicas y cambios culturales configura un escenario en el que la ingeniería y las ciencias sociales convergen para rediseñar los sistemas de transporte. Este proceso no constituye únicamente una transformación técnica, sino también una reconfiguración de las relaciones entre territorio, sociedad y medio ambiente. En este sentido, la movilidad de bajas emisiones no solo reduce impactos, sino que redefine la manera en que las sociedades se organizan y habitan el espacio, consolidándose como un eje estructural de la sostenibilidad contemporánea.

3.3. Gestión ambiental en la industria manufacturera y minera.

La industria manufacturera y la industria minera ocupan un lugar central en la estructura económica y social contemporánea. Ambas configuran cadenas de valor estratégicas que abastecen de bienes, materiales y tecnologías indispensables para el funcionamiento de sociedades modernas. La manufactura transforma insumos en productos elaborados que sostienen la vida cotidiana y el desarrollo económico, mientras que la minería provee los recursos minerales y energéticos que constituyen la base material de la civilización industrial. No obstante, estos sectores se encuentran entre los de mayor impacto ambiental a nivel global, lo que ha llevado a que la gestión ambiental se consolide como un eje estructural en su organización y proyección hacia la sostenibilidad (Kalisz et al., 2022).

La gestión ambiental en la industria manufacturera y minera se entiende como el conjunto de principios, prácticas, metodologías y regulaciones orientadas a integrar los factores ambientales en la planificación, operación y cierre de actividades productivas. Este enfoque no se limita a la mitigación de impactos negativos, sino que incorpora una visión sistémica que abarca desde la eficiencia en el uso de recursos hasta la reducción de riesgos ambientales, la innovación tecnológica y el cumplimiento de marcos normativos nacionales e internacionales.

En la industria manufacturera, los impactos ambientales provienen de múltiples etapas del ciclo de producción. La obtención y transformación de materias primas, el consumo energético en procesos industriales, el uso de agua y productos químicos, así como la generación de emisiones y residuos sólidos, configuran un conjunto de externalidades ambientales de gran relevancia. Sectores como la industria textil, alimentaria, química, automotriz o electrónica han sido objeto de especial atención por la magnitud de sus flujos materiales y energéticos, y por la complejidad de sus cadenas

globales de suministro. La gestión ambiental en este ámbito incorpora metodologías como la producción más limpia, el análisis de ciclo de vida, la ecoeficiencia y la economía circular, todas orientadas a minimizar insumos y emisiones, y a cerrar ciclos materiales mediante la reutilización y el reciclaje (Amon et al., 2022).

Por su parte, la minería se caracteriza por su intensidad en la utilización de recursos y por su localización en ecosistemas sensibles. La extracción de minerales metálicos, no metálicos y energéticos implica la remoción de grandes volúmenes de material, el consumo de agua y energía, y la generación de desechos sólidos y líquidos de difícil tratamiento. La gestión ambiental minera se articula, por lo tanto, en torno a dimensiones críticas como la gestión de relaves, el tratamiento de aguas contaminadas, la rehabilitación de suelos, la restauración de ecosistemas y el cierre responsable de minas. Además, las operaciones mineras suelen tener efectos significativos sobre comunidades locales, lo que exige integrar la gestión ambiental con procesos de gestión social y de gobernanza participativa.

Un componente esencial de la gestión ambiental en ambos sectores es el cumplimiento de marcos normativos y estándares internacionales. Organismos como la Organización Internacional de Normalización (ISO) han establecido lineamientos específicos, siendo la norma ISO 14001 sobre sistemas de gestión ambiental un referente global en el sector manufacturero y minero (Murthy & Ramakrishna, 2022). Estos sistemas proporcionan estructuras organizativas que permiten planificar, implementar, controlar y mejorar procesos ambientales dentro de las empresas. En el caso de la minería, además de ISO, se han desarrollado estándares como el International Cyanide Management Code para la minería aurífera o las guías del International Council on Mining and Metals (ICMM), que establecen buenas prácticas para la protección ambiental y la gestión de riesgos.

La gestión ambiental en la industria manufacturera se apoya cada vez más en la innovación tecnológica. Tecnologías de eficiencia energética, sistemas de captura y aprovechamiento de emisiones, métodos de tratamiento de aguas residuales y técnicas avanzadas de reciclaje forman parte del repertorio de soluciones implementadas. La digitalización también desempeña un papel creciente mediante sistemas de monitoreo en tiempo real, análisis de datos y simulaciones que permiten optimizar procesos industriales y reducir consumos de insumos. En este sentido, la integración de la industria manufacturera en el paradigma de la Industria 4.0 abre nuevas posibilidades para la gestión ambiental, al articular automatización, sensores inteligentes e inteligencia artificial en el control de impactos (Shi et al., 2021).

En el ámbito minero, la innovación tecnológica ha permitido mejorar el desempeño ambiental mediante técnicas de minería de precisión, que optimizan la extracción de recursos y reducen la generación de residuos. Asimismo, se han desarrollado sistemas de monitoreo ambiental basados en sensores remotos, drones y modelación hidrológica, que facilitan la detección temprana de riesgos y la implementación de medidas preventivas. La gestión de relaves y de aguas contaminadas ha sido objeto de avances significativos, incluyendo el uso de tecnologías de espesamiento, filtrado y almacenamiento en condiciones seguras que disminuyen riesgos de contaminación.

La integración de la economía circular en la industria manufacturera y minera constituye un enfoque emergente de gran relevancia. En la manufactura, esto se traduce en la reutilización de materiales, en el diseño modular y reparable de productos, y en la incorporación de materiales reciclados en procesos productivos. En la minería, la economía circular se refleja en la valorización de residuos mineros como insumos para otros sectores, como la construcción o la producción de cemento, y en la recuperación de

metales de relaves y escorias mediante tecnologías avanzadas. Estos enfoques buscan reducir la presión sobre recursos vírgenes y transformar residuos en nuevas oportunidades productivas (Koul et al., 2022).

La dimensión social de la gestión ambiental en estos sectores es igualmente relevante. Tanto la manufactura como la minería interactúan con comunidades locales, generando expectativas y tensiones vinculadas al acceso a recursos naturales, la calidad ambiental y las condiciones laborales. La gestión ambiental contemporánea integra, por lo tanto, mecanismos de participación ciudadana, consultas previas y procesos de diálogo social como componentes necesarios para garantizar legitimidad y sostenibilidad en las operaciones. La transparencia en la comunicación de riesgos, el acceso a información ambiental y la rendición de cuentas se han convertido en principios fundamentales en este ámbito.

El monitoreo y la evaluación de impactos constituyen instrumentos indispensables en la gestión ambiental de los sectores manufacturero y minero (Koul et al., 2022). Las evaluaciones de impacto ambiental (EIA) permiten identificar, predecir y gestionar los efectos potenciales de proyectos antes de su implementación, mientras que las auditorías ambientales y los reportes de sostenibilidad ofrecen mecanismos de seguimiento continuo. La aplicación de indicadores ambientales estandarizados facilita la comparabilidad entre empresas y sectores, promoviendo la mejora continua y el cumplimiento de compromisos internacionales en materia de sostenibilidad.

La relación entre gestión ambiental, industria manufacturera y minera se encuentra también enmarcada en los Objetivos de Desarrollo Sostenible. En particular, el ODS 9, referido a la industria, la innovación y la infraestructura; el ODS 12, relativo a la producción y consumo responsables; y el ODS 13, centrado en la acción climática, establecen metas específicas que orientan a estos sectores hacia un desempeño más

responsable y sostenible. Las políticas públicas y las iniciativas multilaterales han desempeñado un papel clave en incentivar la transición mediante regulaciones, incentivos económicos y esquemas de cooperación internacional (Awewomom et al., 2024).

La investigación científica y la cooperación entre universidades, centros de innovación y empresas constituyen un componente transversal de la gestión ambiental en la manufactura y la minería. La generación de conocimiento aplicado, el desarrollo de nuevas tecnologías y la formación de profesionales especializados permiten avanzar hacia soluciones cada vez más sofisticadas y adaptadas a los contextos locales. La colaboración interinstitucional, tanto a nivel nacional como internacional, facilita la difusión de buenas prácticas y la estandarización de criterios (Liu et al., 2021).

Po tales razones, la gestión ambiental en la industria manufacturera y minera se configura como un proceso multidimensional que articula marcos normativos, innovación tecnológica, participación social y estrategias de economía circular. Su objetivo central consiste en integrar el desempeño ambiental en la dinámica productiva, transformando sectores de alta intensidad material y energética en actores clave de la transición hacia sociedades sostenibles. El desafío no radica únicamente en reducir impactos negativos, sino en reconceptualizar los procesos productivos desde una perspectiva sistémica que coloque al ambiente en el núcleo de la planificación industrial y minera. De esta manera, la gestión ambiental se convierte en un elemento estratégico no solo para el cumplimiento regulatorio, sino también para la construcción de modelos de desarrollo compatibles con los límites planetarios.

3.4. Energías renovables y su integración en sistemas urbanos y rurales.

La energía constituye un elemento estructural de las sociedades contemporáneas, pues sostiene los procesos productivos, los sistemas de transporte, los servicios básicos y la vida cotidiana de la población. Durante gran parte del siglo XX, los sistemas energéticos se organizaron en torno a los combustibles fósiles, particularmente el petróleo, el carbón y el gas natural. Este modelo, aunque permitió un crecimiento económico acelerado y la expansión de infraestructuras a escala global, generó impactos ambientales de gran magnitud, entre los cuales destacan las emisiones de gases de efecto invernadero y la degradación de ecosistemas vinculada a la extracción de recursos. En este contexto, el desarrollo y la integración de las energías renovables en sistemas urbanos y rurales se ha consolidado como uno de los pilares de la transición hacia sociedades sostenibles (Natividad & Benalcazar, 2023).

Las energías renovables se definen como aquellas fuentes que provienen de flujos naturales inagotables o de regeneración rápida, tales como la radiación solar, el viento, la energía hídrica de pequeño y gran caudal, la geotermia y la biomasa. Su carácter renovable no solo radica en su disponibilidad a escala planetaria, sino también en su capacidad de integrarse a sistemas energéticos con menores impactos ambientales en comparación con las fuentes fósiles. La transición energética contemporánea plantea, por tanto, la necesidad de transformar matrices energéticas nacionales y locales, incorporando de manera creciente fuentes renovables que permitan reducir la dependencia de recursos no renovables y mitigar los efectos del cambio climático.

En los sistemas urbanos, la integración de energías renovables adquiere una importancia estratégica debido a la concentración de la población y al elevado consumo energético asociado a edificaciones, transporte, industrias y servicios. La urbanización contemporánea, que alberga a más de la mitad de la población mundial, requiere

soluciones energéticas que respondan simultáneamente a criterios de sostenibilidad, seguridad energética y resiliencia frente a crisis ambientales o económicas. En este marco, la energía solar fotovoltaica y térmica ha emergido como una de las tecnologías más difundidas en el entorno urbano. La instalación de paneles solares en techos de edificios residenciales, comerciales e industriales constituye una práctica que transforma a las ciudades en espacios de generación descentralizada (Al-Thani et al., 2022). Al mismo tiempo, los sistemas solares térmicos para calentamiento de agua contribuyen a reducir la demanda de energía en el sector residencial.

La energía eólica, aunque más asociada a entornos rurales o costeros, también encuentra aplicaciones en el ámbito urbano a través de aerogeneradores de pequeña escala diseñados para operar en edificios o en micro-redes. En las ciudades, el desarrollo de redes inteligentes permite gestionar la integración de múltiples fuentes renovables y coordinar la demanda con la oferta en tiempo real. Estos sistemas utilizan tecnologías digitales para equilibrar cargas, almacenar excedentes en baterías o derivarlos hacia otras aplicaciones, reduciendo así la vulnerabilidad a interrupciones y aumentando la eficiencia global del sistema.

La integración de energías renovables en sistemas urbanos también está vinculada con la movilidad eléctrica (Østergaard et al., 2022). El despliegue de vehículos eléctricos requiere de una infraestructura de recarga alimentada por fuentes renovables para garantizar la reducción efectiva de emisiones a lo largo del ciclo de vida. En este sentido, los sistemas urbanos de energía renovable no solo se orientan al consumo estacionario en edificaciones, sino que también se conectan con las redes de transporte y con la infraestructura de servicios, generando un entramado energético integral.

En los sistemas rurales, la integración de energías renovables responde a dinámicas específicas asociadas a la dispersión territorial, a la dificultad de acceso a redes

eléctricas convencionales y a la necesidad de impulsar procesos productivos agrícolas e industriales en territorios alejados de los centros urbanos. Las energías renovables ofrecen aquí una solución para superar brechas de acceso y promover el desarrollo rural sostenible. La electrificación rural mediante paneles solares, sistemas eólicos de pequeña escala, microcentrales hidroeléctricas y biodigestores permite mejorar la calidad de vida de comunidades rurales, facilitando el acceso a iluminación, agua potable, telecomunicaciones y servicios de salud y educación.

La biomasa adquiere un papel destacado en entornos rurales debido a la disponibilidad de residuos agrícolas, forestales y pecuarios (Laimon & Yusaf, 2024). El uso de biodigestores para la producción de biogás no solo provee energía limpia para la cocción de alimentos y la generación eléctrica, sino que también produce biofertilizantes que se reintegran a los sistemas agrícolas, cerrando ciclos de nutrientes y reduciendo la dependencia de fertilizantes sintéticos. La integración de estos sistemas en comunidades rurales fortalece su autonomía energética y su resiliencia frente a fluctuaciones de precios de combustibles fósiles.

En términos técnicos, la integración de energías renovables en sistemas urbanos y rurales requiere de modelos de generación centralizada, descentralizada e híbrida. Los sistemas centralizados corresponden a grandes plantas solares, eólicas o hidroeléctricas que alimentan redes nacionales de distribución, mientras que los descentralizados se refieren a instalaciones a pequeña escala conectadas a micro-redes o sistemas aislados. Los modelos híbridos, que combinan diferentes fuentes renovables y sistemas de almacenamiento, permiten adaptar la oferta energética a las variaciones de la demanda y a la intermitencia de algunas fuentes, como la solar y la eólica (Farghali et al., 2023).

La gestión del almacenamiento energético constituye un componente crítico en esta integración. Tecnologías de baterías de litio, sistemas de bombeo hidroeléctrico,

almacenamiento térmico y, más recientemente, baterías de estado sólido e hidrógeno verde, configuran alternativas para estabilizar el suministro de energías renovables. En entornos urbanos, el almacenamiento facilita la gestión de la demanda y reduce los picos de consumo, mientras que en áreas rurales garantiza la continuidad del servicio en sistemas aislados.

La implementación de energías renovables en entornos urbanos y rurales se articula con marcos normativos y políticas públicas que establecen incentivos, regulaciones y estándares técnicos. Los programas de subsidios a la instalación de paneles solares, los esquemas de tarifas de inyección a la red (feed-in tariffs) y los certificados de energía renovable constituyen mecanismos que han favorecido la expansión de estas tecnologías en múltiples países (Di Silvestre et al., 2021). Al mismo tiempo, la planificación energética nacional integra metas de participación de renovables en la matriz energética, vinculadas a compromisos internacionales como los establecidos en el Acuerdo de París y en los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

La dimensión social de la integración de energías renovables también es fundamental. En las ciudades, la adopción de tecnologías renovables requiere de procesos de sensibilización ciudadana, así como de la participación de comunidades en proyectos de energía compartida, como las cooperativas solares. En las zonas rurales, los proyectos de energías renovables deben adaptarse a contextos culturales y económicos específicos, incorporando procesos participativos que garanticen la apropiación local y la sostenibilidad en el tiempo. La gestión comunitaria de micro-redes renovables constituye un ejemplo de cómo la dimensión social se articula con los aspectos técnicos y ambientales.

La investigación científica y la innovación tecnológica siguen ampliando el horizonte de integración de energías renovables. El desarrollo de paneles solares de

tercera generación, de turbinas eólicas flotantes, de sistemas geotérmicos mejorados y de tecnologías de hidrógeno verde abre nuevas posibilidades para su incorporación tanto en entornos urbanos como rurales (Chen et al., 2024). Asimismo, los modelos de simulación energética permiten diseñar sistemas integrados que optimicen la combinación de fuentes, almacenamiento y demanda, reduciendo costos e impactos ambientales.

Dicho esto, la integración de energías renovables en sistemas urbanos y rurales constituye un proceso multidimensional que combina aspectos técnicos, sociales, económicos y ambientales. En el ámbito urbano, las renovables se vinculan con la descentralización de la generación, la digitalización de redes y la electrificación de la movilidad. En el ámbito rural, se orientan a la electrificación de comunidades, a la valorización de residuos y al fortalecimiento de la autonomía energética (Trevisan et al., 2023). La convergencia de estos procesos configura un escenario en el que las energías renovables no solo reducen impactos ambientales, sino que también contribuyen a transformar las estructuras energéticas hacia modelos más resilientes, equitativos y sostenibles. La ingeniería desempeña, en este contexto, un papel central al desarrollar, adaptar e implementar soluciones tecnológicas que faciliten la transición energética en sus múltiples dimensiones.

Referencias

- Abbott, K. W., & Snidal, D. (2021). The governance triangle: Regulatory standards institutions and the shadow of the state. In *The spectrum of international institutions* (pp. 52-91). Routledge.
- Abeysekera, I. (2022). A framework for sustainability reporting. *Sustainability Accounting, Management and Policy Journal*, 13(6), 1386–1409.
- Adeleke, O., Akinlabi, S. A., Jen, T. C., & Dunmade, I. (2022). Environmental impact assessment of the current, emerging, and alternative waste management systems using life cycle assessment tools: A case study of Johannesburg, South Africa. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(5), 7366-7381.
- Ahmed, F., Loc, H. H., Babel, M. S., & Stamm, J. (2024). A community-scale study on nature-based solutions (NBS) for stormwater management under tropical climate: The case of the Asian Institute of Technology (AIT), Thailand. *Journal of Hydroinformatics*, 26(5), 1080-1099.
- Al Shdifat, M., Jalón, M. L., Puertas, E., & Chiachío, J. (2023). A quantitative group decision-making methodology for structural eco-materials selection based on qualitative sustainability attributes. *Applied Sciences*, 13(22), 12310.
- Alshehri, K., Gao, Z., Harbottle, M., Sapsford, D., & Cleall, P. (2023). Life cycle assessment and cost-benefit analysis of nature-based solutions for contaminated land remediation: A mini-review. *Heliyon*, 9(10).
- Al-Thani, H., Koç, M., Isaifan, R. J., & Bicer, Y. (2022). A review of the integrated renewable energy systems for sustainable urban mobility. *Sustainability*, 14(17), 10517.
- Amon, D. J., Gollner, S., Morato, T., Smith, C. R., Chen, C., Christiansen, S., ... & Pickens, C. (2022). Assessment of scientific gaps related to the effective environmental management of deep-seabed mining. *Marine Policy*, 138, 105006.
- Andronie, M., Lăzăroiu, G., Iatagan, M., Hurloiu, I., & Dijmărescu, I. (2021). Sustainable cyber-physical production systems in big data-driven smart urban economy: A systematic literature review. *Sustainability*, 13(2), 751.
- Asamoah, S., Simpeh, E. K., Mensah, H., Bonney, B., & Ahadzie, D. K. (2024). A systematic review on the role of nature-based solutions (NbS) in housing delivery in Africa. *Journal of Engineering, Design and Technology*.
- Awewomom, J., Dzeble, F., Takyi, Y. D., Ashie, W. B., Ettey, E. N. Y. O., Afua, P. E., ... & Akoto, O. (2024). Addressing global environmental pollution using environmental control

- techniques: A focus on environmental policy and preventive environmental management. *Discover Environment*, 2(1), 8.
- Awewomom, J., Dzeble, F., Takyi, Y. D., Ashie, W. B., Ettey, E. N. Y. O., Afua, P. E., ... & Akoto, O. (2024). Addressing global environmental pollution using environmental control techniques: A focus on environmental policy and preventive environmental management. *Discover Environment*, 2(1), 8.
- Awewomom, J., Dzeble, F., Takyi, Y. D., Ashie, W. B., Ettey, E. N. Y. O., Afua, P. E., ... & Akoto, O. (2024). Addressing global environmental pollution using environmental control techniques: A focus on environmental policy and preventive environmental management. *Discover Environment*, 2(1), 8.
- Bachanek, K. H., Karnowski, J., Drozd, W., & Rzepka, A. (2023, May). The development of low-emission public urban transport in Europe. In *International Conference on Business and Technology* (pp. 377-384). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Barbosa, L. G., Alves, M. A. S., & Grelle, C. E. V. (2021). Actions against sustainability: Dismantling of the environmental policies in Brazil. *Land Use Policy*, 104, 105384.
- Barikdar, C. R., Hassan, J., Saimon, A. S. M., Alam, G. T., Rozario, E., Ahmed, M. K., & Hossain, S. (2022). Life cycle sustainability assessment of bio-based and recycled materials in eco-construction projects. *J. Ecohumanism*, 1(2), 151-162.
- Barkhausen, R., Durand, A., & Fick, K. (2022). Review and analysis of ecodesign directive implementing measures: Product regulations shifting from energy efficiency towards a circular economy. *Sustainability*, 14(16), 10318.
- Bibri, S. E., Alexandre, A., Sharifi, A., & Krogstie, J. (2023). Environmentally sustainable smart cities and their converging AI, IoT, and big data technologies and solutions: An integrated approach to an extensive literature review. *Energy Informatics*, 6(1), 9.
- Borowski, P. F. (2021). Digitization, digital twins, blockchain, and industry 4.0 as elements of management process in enterprises in the energy sector. *Energies*, 14(7), 1885.
- Cheela, V. R. S., John, M., Biswas, W. K., & Dubey, B. (2021). Environmental impact evaluation of current municipal solid waste treatments in India using life cycle assessment. *Energies*, 14(11), 3133.
- Chen, L., Hu, Y., Wang, R., Li, X., Chen, Z., Hua, J., ... & Yap, P. S. (2024). Green building practices to integrate renewable energy in the construction sector: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 22(2), 751-784.

- Chen, X., Li, C., Li, M., & Fang, K. (2021). Revisiting the application and methodological extensions of the planetary boundaries for sustainability assessment. *Science of the Total Environment*, 788, 147886.
- Chu, X., Nazir, S., Wang, K., Leng, Z., & Khalil, W. (2021). Big data and its V's with IoT to develop sustainability. *Scientific Programming*, 2021(1), 3780594.
- De Vrij, E., & Vanoutrive, T. (2022). 'No-one visits me anymore': Low emission zones and social exclusion via sustainable transport policy. *Journal of Environmental Policy & Planning*, 24(6), 640-652.
- Deng, T., Chau, K. W., & Duan, H. F. (2021). Machine learning based marine water quality prediction for coastal hydro-environment management. *Journal of Environmental Management*, 284, 112051.
- Di Silvestre, M. L., Ippolito, M. G., Sanseverino, E. R., Sciumè, G., & Vasile, A. (2021). Energy self-consumers and renewable energy communities in Italy: New actors of the electric power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111565.
- Dong, L., Longwu, L., Zhenbo, W., Liangkan, C., & Faming, Z. (2021). Exploration of coupling effects in the Economy–Society–Environment system in urban areas: Case study of the Yangtze River Delta Urban Agglomeration. *Ecological Indicators*, 128, 107858.
- dos Muchangos, L. S., Mejia, C., Gupta, R., Sadreghazi, S., & Kajikawa, Y. (2025). A systematic review of life cycle assessment and environmental footprint for the global coffee value chain. *Environmental Impact Assessment Review*, 111, 107740.
- Duong, K. D., & Hai Thi Thanh, T. (2022). Association between post-covid socio-economic development and energy-growth-environment nexus from developing economy. *International Journal of Economics and Finance Studies*, 14(2), 247–270.
- Ernwein, M., & Palmer, J. (2025). Making the mos(s)t of nature? Cleantech, smart nature-based solutions, and the 'rendering investable' of urban moss. *Environment and Planning E: Nature and Space*, 8(1), 306-324.
- Fan, J., Liu, C., Xie, J., Han, L., Zhang, C., Guo, D., ... & McConkey, B. G. (2022). Life cycle assessment on agricultural production: A mini review on methodology, application, and challenges. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(16), 9817.
- Farghali, M., Osman, A. I., Chen, Z., Abdelhaleem, A., Ihara, I., Mohamed, I. M., ... & Rooney, D. W. (2023). Social, environmental, and economic consequences of integrating renewable energies in the electricity sector: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(3), 1381-1418.

- Fernandes, V., Andreoli, C. V., Bruna, G. C., & Philippi Jr, A. (2021). History and evolution of the environmental management system in Brazil. *Historia Ambiental Latinoamericana y Caribeña (HALAC)*, 11(2), 275–310.
- Gautam, S., Gautam, A. S., Awasthi, A., & N, R. (2024). Regulatory frameworks and policies. In *Sustainable air: Strategies for cleaner atmosphere and healthier communities* (pp. 49-52). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Guarini, E., Mori, E., & Zuffada, E. (2022). Localizing the Sustainable Development Goals: a managerial perspective. *Journal of Public Budgeting, Accounting & Financial Management*, 34(5), 583–601.
- Hao, Y., Guo, Y., & Wu, H. (2022). The role of information and communication technology on green total factor energy efficiency: Does environmental regulation work? *Business Strategy and the Environment*, 31(1), 403-424.
- Hariram, N. P., Mekha, K. B., Suganthan, V., & Sudhakar, K. (2023). Sustainalism: An integrated socio-economic-environmental model to address sustainable development and sustainability. *Sustainability*, 15(13), 10682.
- Kalisz, S., Kibort, K., Mioduska, J., Lieder, M., & Małachowska, A. (2022). Waste management in the mining industry of metals ores, coal, oil and natural gas—A review. *Journal of Environmental Management*, 304, 114239.
- Koul, B., Yakoob, M., & Shah, M. P. (2022). Agricultural waste management strategies for environmental sustainability. *Environmental Research*, 206, 112285.
- Koul, B., Yakoob, M., & Shah, M. P. (2022). Agricultural waste management strategies for environmental sustainability. *Environmental Research*, 206, 112285.
- Kozera, A., Satoła, Ł., & Standar, A. (2024). European Union co-funded investments in low-emission and green energy in urban public transport in Poland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 200, 114530.
- Krämer, L. (2024). EU ecodesign and product policy: From energy efficiency to circular economy. *Journal for European Environmental & Planning Law*, 21(3-4), 343-360.
- Kumar, B., Ghosh, T., Purewal, S. S., & Bala, K. (2023). Life cycle assessment (LCA), techno-economic analysis (TEA) and environmental impact assessment (EIA) of algal biorefinery. In *Algae refinery* (pp. 209-235). CRC Press.
- Kumar, Y. (2024). 5 Eco-materials. *Eco-Materials and Green Energy for a Sustainable Future*, 75.

- Laimon, M., & Yusaf, T. (2024). Towards energy freedom: Exploring sustainable solutions for energy independence and self-sufficiency using integrated renewable energy-driven hydrogen system. *Renewable Energy*, 222, 119948.
- Li, J., Zuo, Q., Yu, L., & Ma, J. (2023). A multi-dimensional relationship assessment framework for water resources, social economy and eco-environment: A case study of China's largest arid zone. *Environmental Impact Assessment Review*, 102, 107221.
- Lin, Y. H., & Nitivattananon, V. (2024). A low-emission pathway for tourism passenger transport in small and medium-sized urban destinations—Case of Yilan, Taiwan. *International Journal of Tourism Cities*.
- Liu, S., Wang, X., Guo, G., & Yan, Z. (2021). Status and environmental management of soil mercury pollution in China: A review. *Journal of Environmental Management*, 277, 111442.
- Luca, B. I., Panțiru, A., Timu, A., Bărbuță, M., Diaconu, L. I., Rujan, M., & Diaconu, A. C. (2023, June). Eco-concrete for obtaining “green” construction elements. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1283, No. 1, p. 012007). IOP Publishing.
- Małek, A. (2025). Low-emission hydrogen for transport—A technology overview from hydrogen production to its use to power vehicles. *Energies*, 18(16), 4425.
- Manglano-Redondo, P., Paricio-Garcia, A., & Lopez-Carmona, M. A. (2025). Dynamic low-emission zones for urban mobility: A systematic review. *Applied Sciences*, 15(6), 2915.
- Matheri, A. N., Mohamed, B., Ntuli, F., Nabadda, E., & Ngila, J. C. (2022). Sustainable circularity and intelligent data-driven operations and control of the wastewater treatment plant. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 126, 103152.
- McNeill, J. R., & Mauldin, E. S. (Eds.). (2025). *A companion to global environmental history*. John Wiley & Sons.
- Mughal, N., Arif, A., Jain, V., Chupradit, S., Shabbir, M. S., Ramos-Meza, C. S., & Zhanbayev, R. (2022). The role of technological innovation in environmental pollution, energy consumption and sustainable economic growth: Evidence from South Asian economies. *Energy Strategy Reviews*, 39, 100745.
- Murthy, V., & Ramakrishna, S. (2022). A review on global E-waste management: Urban mining towards a sustainable future and circular economy. *Sustainability*, 14(2), 647.
- Natividad, L. E., & Benalcazar, P. (2023). Hybrid renewable energy systems for sustainable rural development: Perspectives and challenges in energy systems modeling. *Energies*, 16(3), 1328.

- Nemecek, T., Roesch, A., Bystricky, M., Jeanneret, P., Lansche, J., Stüssi, M., & Gaillard, G. (2024). Swiss agricultural life cycle assessment: A method to assess the emissions and environmental impacts of agricultural systems and products. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 29(3), 433-455.
- Ortega, A., Gkoumas, K., Tsakalidis, A., & Pekár, F. (2021). Low-emission alternative energy for transport in the EU: State of play of research and innovation. *Energies*, 14(22), 7764.
- Østergaard, P. A., Duic, N., Noorollahi, Y., & Kalogirou, S. (2022). Renewable energy for sustainable development. *Renewable Energy*, 199, 1145-1152.
- Patra, M. (2021, September). European ecodesign material efficiency standardization overview for circular economy aspects in motor and power drive systems. In *Energy efficiency in motor systems: Proceedings of the 11th International Conference EEMODS'19* (pp. 231-242). Cham: Springer International Publishing.
- Patra, M., Cormenier, T., Louise, A., & Murlon, P. (2022, May). European ecodesign material efficiency standardization supporting circular economy aspects of power drive systems for sustainability. In *International Conference on Energy Efficiency in Motor Driven Systems* (pp. 473-494). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Pereira, P., Yin, C., & Hua, T. (2023). Nature-based solutions, ecosystem services, disservices, and impacts on well-being in urban environments. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 33, 100465.
- Polverini, D. (2021). Regulating the circular economy within the ecodesign directive: Progress so far, methodological challenges and outlook. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1113-1123.
- Popescu, C., Dissanayake, H., Mansi, E., & Stancu, A. (2024). Eco breakthroughs: Sustainable materials transforming the future of our planet. *Sustainability*, 16(23), 10790.
- Puri, M., Gandhi, K., & Kumar, M. S. (2023). Emerging environmental contaminants: A global perspective on policies and regulations. *Journal of Environmental Management*, 332, 117344.
- Rane, N. (2023). Integrating leading-edge artificial intelligence (AI), internet of things (IoT), and big data technologies for smart and sustainable architecture, engineering and construction (AEC) industry: Challenges and future directions. *Engineering and Construction (AEC) Industry: Challenges and Future Directions* (September 24, 2023).
- Razzaq, A., Sharif, A., Ozturk, I., & Afshan, S. (2023). Dynamic and threshold effects of energy transition and environmental governance on green growth in COP26 framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 179, 113296.

- Robertson, M. (2021). *Sustainability principles and practice*. Routledge.
- Rodríguez Martín, J., López-Errasti, O., & Ruiz de Arbulo López, P. (2022). Analysis of the impact of eco-design on the circular economy: A bibliometric analysis of publications in Spain. *Dyna*, 89(224), 140-147.
- Roesch, A., Douziech, M., Mann, S., Lansche, J., & Gaillard, G. (2025). Consequences of the use or absence of life cycle assessment in novel environmental assessment methods and food ecolabels. *Cleaner Production Letters*, 8, 100087.
- Ruggerio, C. A. (2021). Sustainability and sustainable development: A review of principles and definitions. *Science of the Total Environment*, 786, 147481.
- Saeed, F. (2021). Environmental sustainability and digitization. *International Journal of Modern Agriculture and Environment*, 1(2), 83-98.
- Saleh, H. M., Dawoud, M. M., & Hassan, A. I. (2023). Sustainable and eco-friendly building materials. *Frontiers in Built Environment*, 9, 1160556.
- Shi, J., Huang, W., Han, H., & Xu, C. (2021). Pollution control of wastewater from the coal chemical industry in China: Environmental management policy and technical standards. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110883.
- Soni, A., Tripathi, D., Sahariya, J., & Sharma, K. N. (Eds.). (2024). *Eco-materials and green energy for a sustainable future*. CRC Press.
- Sonia, Y. K., & Meena, S. (2024). Eco-materials: Opportunity, applications, and challenges. *Eco-Materials and Green Energy for a Sustainable Future*, 75-92.
- Sparviero, S., & Ragnedda, M. (2021). Towards digital sustainability: The long journey to the sustainable development goals 2030. *Digital Policy, Regulation and Governance*, 23(3), 216–228.
- Tan, H., Li, J., He, M., Li, J., Zhi, D., Qin, F., & Zhang, C. (2021). Global evolution of research on green energy and environmental technologies: A bibliometric study. *Journal of Environmental Management*, 297, 113382.
- Thanatrakolsri, P., & Sirithian, D. (2025). Toward low-carbon mobility: Greenhouse gas emissions and reduction opportunities in Thailand's road transport sector. *Clean Technologies*, 7(3), 60.
- Timm, J. F. G., Maciel, V. G., & Passuello, A. (2023). Towards sustainable construction: A systematic review of circular economy strategies and ecodesign in the built environment. *Buildings*, 13(8), 2059.

- Tjahjadi, B., Soewarno, N., Karima, T. E., & Sutarsa, A. A. P. (2023). Business strategy, spiritual capital and environmental sustainability performance: Mediating role of environmental management process. *Business Process Management Journal*, 29(1), 77–99.
- Torrens, A., Sepúlveda-Ruiz, P., Aulinas, M., & Folch, M. (2025). Innovative carwash wastewater treatment and reuse through nature-based solutions. *Clean Technologies*, 7(1), 12.
- Trevisan, R., Ghiani, E., & Pilo, F. (2023). Renewable energy communities in positive energy districts: A governance and realisation framework in compliance with the Italian regulation. *Smart Cities*, 6(1), 563-585.
- Trusina, I., & Jermolajeva, E. (2021, May). A new approach to the application of the principles of sustainable development. In *Proceedings of the 2021 International Conference Economic Science for Rural Development, Jelgava, LLU ESAF* (pp. 11–14).
- Tseng, M. L., Tran, T. P. T., Ha, H. M., Bui, T. D., & Lim, M. K. (2021). Sustainable industrial and operation engineering trends and challenges toward Industry 4.0: A data-driven analysis. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 38(8), 581-598.
- Tu, Y. T., Aljumah, A. I., Van Nguyen, S., Cheng, C. F., Tai, T. D., & Qiu, R. (2023). Achieving sustainable development goals through a sharing economy: Empirical evidence from developing economies. *Journal of Innovation & Knowledge*, 8(1), 100299.
- Turnbull, C., Lillemo, M., & Hvoslef-Eide, T. A. (2021). Global regulation of genetically modified crops amid the gene edited crop boom—a review. *Frontiers in Plant Science*, 12, 630396.
- Umar, M., & Safi, A. (2023). Do green finance and innovation matter for environmental protection? A case of OECD economies. *Energy Economics*, 119, 106560.
- Valdes, H., Correa, C., Suarez, C., Laurens Arredondo, L. A., Hurtado Espinosa, M. F., Vera-Puerto, I. L., ... & Arias, C. A. (2025). Conceptual model for facultative symbiosis between sustainable construction and nature-based solutions in the training of engineers in Chile. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 26(4), 773-803.
- Van Doorselaer, K. (2022). The role of ecodesign in the circular economy. In *Circular economy and sustainability* (pp. 189-205). Elsevier.
- Walker, A. M., Opferkuch, K., Roos Lindgreen, E., Raggi, A., Simboli, A., Vermeulen, W. J., ... & Salomone, R. (2022). What is the relation between circular economy and sustainability? Answers from frontrunner companies engaged with circular economy practices. *Circular Economy and Sustainability*, 2(2), 731–758.
- Wren, D. A., & Bedeian, A. G. (2023). *The evolution of management thought*. John Wiley & Sons.

- Yousaf, Z., Radulescu, M., Sinisi, C. I., Serbanescu, L., & Păunescu, L. M. (2021). Towards sustainable digital innovation of SMEs from the developing countries in the context of the digital economy and frugal environment. *Sustainability*, 13(10), 5715.
- Zhang, J., Peng, X., Ouyang, Y., Ballesteros-Pérez, P., Ke, Y., Lu, Q., ... & Skitmore, M. (2021). Environmental life cycle impact assessment of transportation infrastructure: A multi-case study in international perspective. *International Journal of Sustainable Transportation*, 16(11), 1020-1031.
- Zhang, Z., Hu, G., Mu, X., & Kong, L. (2022). From low carbon to carbon neutrality: A bibliometric analysis of the status, evolution and development trend. *Journal of Environmental Management*, 322, 116087.