

Héctor Guadalupe Ramírez-Escamilla,* María Concepción Martínez-Rodríguez*, Diego Domínguez-Solís*

El papel de la tecnología para la gestión integral de residuos textiles en México: una revisión[◇]

The role of technology in integrated textile waste management in Mexico: a review

Abstract | The textile industry, driven by “fast fashion,” is one of the main contributors to environmental degradation through the rapid renewal of styles, leading to substantial garment waste by consumers. In response to this scenario and in the context of constant modernization, the automation of processes has been promoted with the aim of controlling and optimizing the production chain throughout the entire textile lifecycle, seeking more efficient management and a significant reduction in textile waste (TW). The main objective of this study is to conduct a systematic literature review to identify and critically evaluate the technologies used in comprehensive textile waste management. The methodology applied consisted of retrieving and analyzing research articles from the Scopus database, following the PRISMA¹ methodology. The search covered a ten-year period, examining a total of 33 articles, of which 14 were selected as relevant. As a result, it was found that the most applied technologies in textile waste management are artificial intelligence (AI), the Internet of things (IoT), and blockchain (Bc), serving as enablers for the traceability of textile waste collection systems, the efficient use of raw materials, and responsible consumption through algorithms based on consumer characteristics. In conclusion, these technologies offer innovative solutions that enhance the sustainability of processes, increase operational efficiency, and strengthen the traceability of waste throughout the entire textile value chain.

Keywords | textile industry | technologies | waste management | textile waste.

Resumen | La industria textil, impulsada por la “moda rápida”, es una de las principales contribuidoras de la degradación ambiental a través de la renovación rápida de estilos,

Recibido: 15 de noviembre, 2023.

Aceptado: 12 de mayo, 2025.

* Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo.

◇ Derivado del proyecto de investigación SIP 20251143 del Instituto Politécnico Nacional.

¹ N. del E. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses (Elementos de notificación preferidos para revisiones sistemáticas y metanálisis).

Correos electrónicos: ramzhector153@gmail.com | mcmartinezr@ipn.mx | diegossolis32@gmail.com

Ramírez-Escamilla, Héctor Guadalupe, María Concepción Martínez-Rodríguez y Diego Domínguez-Solís. «El papel de la tecnología para la gestión integral de residuos textiles en México: una revisión.» *INTER DISCIPLINA* vol. 13, n° 37 (septiembre-diciembre 2025): 149-165.

DOI: <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2025.37.87158>

provocando un desperdicio sustancial de prendas por parte de sus consumidores. Ante este escenario y en el contexto de la constante modernización, se ha impulsado la automatización de procesos con el objetivo de controlar y optimizar la cadena de producción a lo largo de todo el ciclo de vida textil, buscando una gestión más eficiente y una reducción significativa de los residuos textiles (RT). El objetivo principal de este estudio es realizar una revisión sistemática de la literatura para identificar y evaluar críticamente las tecnologías empleadas en la gestión integral de residuos textiles. La metodología aplicada consistió en una recuperación y análisis de investigaciones de la base de datos Scopus, siguiendo la metodología PRISMA. La búsqueda abarcó un periodo de diez años, examinando un total de 33 artículos, de los cuales se seleccionaron 14 como pertinentes. Como resultado, se muestra que las tecnologías más aplicadas en la gestión de residuos textiles son la inteligencia artificial (IA), el Internet de las cosas (IoT) y *blockchain* (Bc), siendo facilitadores de la trazabilidad de sistemas de recolección de residuos textiles, aprovechamiento eficiente de materias primas y consumo responsable, a través de algoritmos basados en características del consumidor. En conclusión, estas tecnologías ofrecen soluciones innovadoras, las cuales permiten mejorar la sustentabilidad de los procesos, aumentar la eficiencia operativa y fortalecer la trazabilidad de los residuos a lo largo de toda la cadena de valor textil.

Palabras clave | industria textil | tecnologías | gestión de residuos | residuos textiles.

Introducción

EL AUMENTO DE LA POBLACIÓN ha ocasionado el crecimiento, cada año, de la demanda de recursos naturales como materias primas a ser utilizadas para la elaboración de miles de productos que pueden ser esenciales en nuestra vida cotidiana. Los sectores industriales son uno de los principales responsables del impacto ambiental por su consumo acelerado de recursos y sus contribuciones con gases de efecto invernadero (Calzolari *et al.* 2022), aunque no son los únicos actores involucrados, pues la sociedad en su papel como compradora tienen una contribución significativa en el deterioro ambiental, al ser su consumo de artículos constante y creciente, consecuencia de la frecuente modernización o actualización de estos.

Los sistemas económicos de la mayoría de los sectores industriales se rigen por el aumento en sus ventas, motivando la incorporación de nuevos modelos de productos; sin embargo, esto ha provocado una elevación de su huella de carbono. Uno de los sectores considerados como el más antiguo y el de mayor importancia en la población es la industria de textiles y de la moda (ITM), en la cual, diariamente, se fabrican prendas de todo tipo en distintos países, siendo gran parte de estos productos exportados para su comercialización (Hader *et al.* 2022).

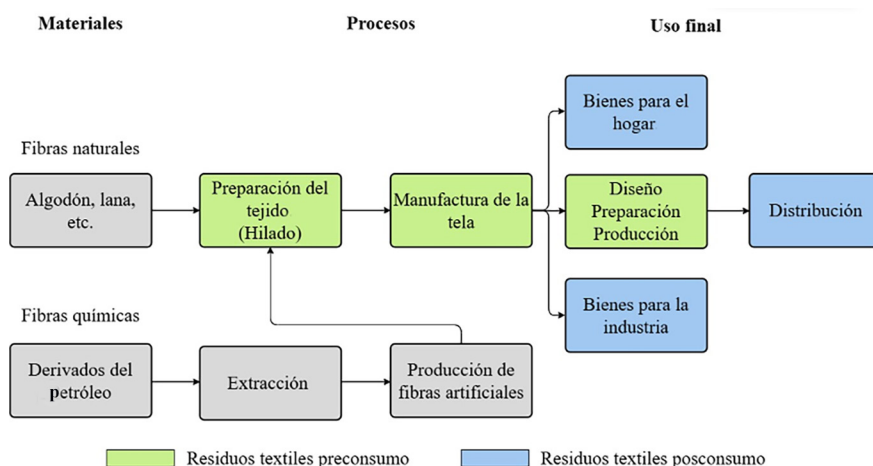
La ITM genera diversas afectaciones al medio ambiente, entre las cuales destacan las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente dióxido de carbono.

no (CO_2); como consecuencia de sus procesos industriales, también se presenta un uso excesivo de agua, particularmente durante las etapas de lavado y teñido de las prendas. Además, el suelo, de igual forma, se ve gravemente afectado, sobre todo en la fase de cultivo de materias primas como el algodón, donde el uso intensivo de fertilizantes químicos deteriora las propiedades fisicoquímicas del suelo. Lo anterior, como resultado de la parte previa a la producción; no obstante, igual existen impactos posteriores al consumo de los productos textiles como la incorrecta disposición de los residuos textiles (RT) sólidos, al terminar gran parte de estos en rellenos sanitarios. Según datos de Abdulla (2023), anualmente se consumen alrededor de 100 millones de prendas nuevas, de las cuales 90 millones terminan en los distintos rellenos sanitarios de todo el mundo, por otro lado, ciertos estudios demuestran que algunas prendas producen ciertos gases al estar expuestas a la intemperie (Schmutz y Som 2022; Shirvanimoghaddam *et al.* 2020), un caso específico son las fibras de lana, las cuales, al descomponerse, emiten amoníaco, un gas tóxico y perjudicial para la salud y el ambiente (Echeverría *et al.* 2019).

Dentro de la cadena de valor de esta industria, se puede identificar la generación de dos tipos de RT, los preconsumo y los posconsumo. En la figura 1 se muestra un esquema de los puntos exactos de los procesos en los cuales se crean cada uno de los RT anteriormente mencionados.

Los residuos preconsumo son todos aquellos remanentes de textiles generados durante el proceso de corte y fabricación de una prenda, gran parte de estos residuos surgen en los comercios o negocios, algunos de estos son los recortes de

Figura 1. Identificación de los tipos de residuos textiles generados en la cadena de producción de la ITM.



Fuente: Adaptado de Mirandona *et al.* (2007).

rollos de tela, hilados y fibras de telas (Nyika y Dinka 2022). Mientras los residuos posconsumo son todas esas prendas desechadas cuando, una vez utilizadas, el poseedor considera que ya no cumplen con ciertas características para seguir usándose, este tipo de residuos proviene de los hogares como lo es la ropa de moda obsoleta, dañada y desgastada (Nyika y Dinka 2022; Shirvanimoghaddam *et al.* 2020; Schmutz y Som 2022).

La gestión adecuada de ambos tipos de residuos plantea desafíos, al implicar una responsabilidad compartida entre los diferentes actores involucrados, los cuales incluyen al productor, vendedor y consumidor. Además, es fundamental por parte de las autoridades gubernamentales asumir su correspondiente responsabilidad en este ámbito. Por lo tanto, en primera instancia, es esencial establecer sistemas facilitadores de la recuperación de estos residuos textiles, seguido de acciones encaminadas a la reutilización o reciclaje (Sandin y Peters 2018).

Ante el creciente problema de los residuos textiles, se ha iniciado una reestructuración significativa en la supervisión de los procesos productivos, abarcando todas las etapas, desde la creación hasta la entrega y la disposición final de los residuos. Este cambio incorpora diversas tecnologías digitales con el objetivo de mejorar el rendimiento, la productividad, la flexibilidad y la eficiencia en los procesos y en las operaciones comerciales (Laskurain-Iturbe *et al.* 2021). Por otro lado, se destaca la toma de decisiones autónomas gracias a la utilización de maquinaria inteligente (Nuttah *et al.* 2023). En la tabla 1, se presentan cuáles son las tecnologías digitales más representativas dentro de la toma de decisiones en la ITM.

En la actualidad, una de las principales ventajas radica en el notorio avance en la promoción de tecnologías, y este progreso debe ser plenamente aprovechado para lograr un manejo más efectivo de la gestión integral de los residuos ge-

Tabla 1. Tecnologías aplicadas en la gestión de procesos industriales.

Tecnologías	Descripción
Internet de las cosas	Implica la interconexión de dispositivos, sensores y máquinas a través de Internet, permite acceder a información automática en procesos de producción y facilita la programación de actividades.
Computación en la nube	Permite el acceso a recursos informáticos, como servidores, almacenamiento y <i>software</i> , a través de Internet. Se usa para alojar aplicaciones, datos y sistemas de control.
Inteligencia artificial	Se aplica en el análisis de datos y la automatización de tareas, además de supervisar el rendimiento de las máquinas y ajustar automáticamente.
<i>Edge computing</i>	Implica procesar datos en el lugar donde se generan, en lugar de enviarlos a la nube para su procesamiento.
Ciberseguridad	Se requieren conexiones seguras que protejan la información de robo o alteraciones.
<i>Blockchain</i>	Proporciona datos inmediatos y compartidos que son almacenados e inalterables. También mejora la confiabilidad y la trazabilidad de los procesos industriales.

Fuente: Adaptado de IBM (S. f.).

nerados en la fabricación de productos. La tecnología no solo puede servir como una herramienta valiosa, sino también como un medio eficiente para difundir una variedad de información y experiencias cruciales para fomentar la disposición correcta de residuos.

Por lo tanto, el objetivo principal de este estudio es realizar una revisión sistemática de la literatura para identificar, gestionar y extraer datos sobre las tecnologías implementadas en la ITM, seguido de una selección de estudios, análisis e interpretación de datos, y presentación de resultados.

Metodología

Para asegurar una metodología clara y rigurosa, esta investigación emplea una revisión sistemática de la literatura utilizando el método PRISMA (preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses), con lo cual se garantiza la reproducibilidad del estudio y permite un análisis exhaustivo de los estudios recuperados en la base de datos.

En primer lugar, se eligió Scopus como base de datos principal. Una vez seleccionada la base de datos, se definieron las siguientes palabras clave y operadores booleanos: "Textile waste" AND "Software" AND "Artificial intelligence" AND "Blockchain", estas palabras fueron colocadas en distinto orden para recuperar el mayor número de estudios posible. La búsqueda se limitó a diez años, de 2014 a 2024, lo cual arrojó 382 artículos potenciales. Se eligió este marco temporal debido a haber sido a inicios del año 2010 cuando comenzó a introducirse el concepto de industria 4.0. Posteriormente, se aplicaron criterios específicos de inclusión y exclusión, para seleccionar únicamente aquellos estudios alineados al objetivo de esta investigación.

Primera etapa de selección: se delimitó la búsqueda a estudios exclusivamente en inglés y se analizaron artículos de caso de estudio, capítulos de libro y publicaciones de conferencias. Con este criterio, el número se redujo a 331 artículos.

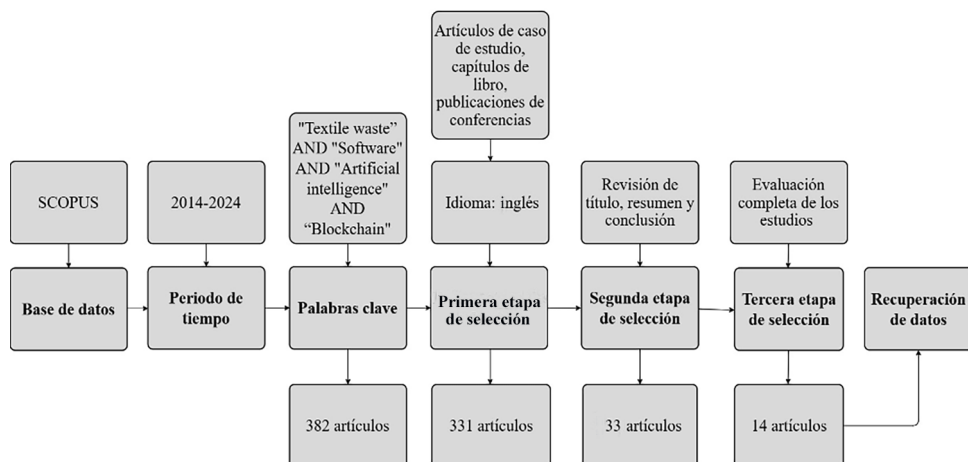
Segunda etapa de selección: se realizó una inspección de los estudios, revisando título, resumen y conclusión, este primer análisis, con el objetivo de asegurar que los artículos seleccionados abordaran el tema central y que fueran estudios de caso en lugar de revisiones. Este proceso de evaluación redujo el número de artículos a 33.

Tercera etapa de selección: esta fase implicó una evaluación completa de los estudios obtenidos de la etapa anterior. El propósito de esto fue analizar que los artículos manejaran la aplicación de una tecnología y que esta fuera aplicada a alguna etapa del proceso de producción de la industria textil, enfocándose en mejorar la gestión de residuos sólidos textiles. Como resultado de esta rigurosa evaluación, se seleccionaron un total de 14 artículos.

Después de recopilar los artículos de esta última etapa, se procedió a resumir la información en una tabla. En primer lugar, se presentó el enfoque y el alcance de cada investigación. Luego, se identificó el tipo de tecnología digital utilizada. Por último, se determinó en qué etapa del ciclo de producción de la ITM se aplicaba dicha tecnología digital.

La descripción de la metodología puede observarse de forma gráfica en la figura 2.

Figura 2. Diagrama de la metodología PRISMA empleada para la revisión sistemática de la literatura.



Fuente: Elaboración propia.

Resultados y discusión

En esta sección, se describe cuáles son las tecnologías clave para la gestión de RT, como el Internet de las cosas (IoT), la tecnología *blockchain* (Bc) y la inteligencia artificial (IA), además de profundizar en su aplicación práctica y beneficio obtenido. Basados en una revisión sistemática de estudios relevantes, estos hallazgos proporcionan una visión completa de la efectividad de la aplicación de tecnologías, las cuales contribuyen en ciertos aspectos a la sustentabilidad en este sector.

En la tabla 2, se recopilan los 14 artículos seleccionados para esta revisión, resumiendo sus contribuciones al estudio de la aplicación de tecnologías en la ITM y en la gestión de sus residuos. Se detalla también el tipo de tecnología, la etapa de aplicación en la cadena de producción de la ITM, el tipo de RT, la aplicación que tuvo la tecnología en la resolución de la problemática y los beneficios obtenidos con su adopción.

Tabla 2. Resumen de la información de los 14 artículos seleccionados en la revisión.

Fuente/País	Tipo de tecnología	Etapa de ITM / Tipo de residuo	Aplicación	Beneficios
Wang y Sun (2024) Estados Unidos	Inteligencia artificial (IA)	Disposición/ Posconsumo	Aplicación móvil inteligente para organizar prendas.	Contribuye a reducir el desperdicio de moda.
Addas <i>et al.</i> (2024) Pakistán	Internet de las cosas (IoT)	Disposición/ Posconsumo	Prototipo de sensor ultrasónico para monitorear el nivel de llenado de contenedores.	Mejor eficiencia de las rutas y menor uso de combustible y emisiones.
Tian <i>et al.</i> (2024) China	Inteligencia artificial (IA)	Disposición/ Posconsumo	Sistemas automáticos de clasificación de ropa.	Mejora la precisión de la clasificación en varios modelos de prendas.
Spyridis <i>et al.</i> (2024) Reino Unido	Inteligencia artificial (IA)	Disposición/ Posconsumo	Ineficiencias de los métodos tradicionales de clasificación textil.	Mejoras en la precisión, eficiencia y escalabilidad de los procesos de clasificación textil.
Zhang <i>et al.</i> (2024) China	Blockchain (Bc)	Diseño de productos/ Posconsumo	Se investiga la estrategia óptima de introducción de Bc en una cadena de suministro de circuito cerrado de textiles y prendas de vestir.	La implementación simultánea de política de fondos gubernamentales y la Bc incentiva a los fabricantes de ITM a mejorar el grado de sostenibilidad de sus productos.
Mizunuma <i>et al.</i> (2024) Japón	Inteligencia artificial (IA)	Disposición/ Posconsumo	Uso de IA para evaluar la ropa y clasificarla como “reutilizable” o “reciclable”.	Reducir el volumen de ropa desechada y esfuerzo para la clasificación manual.
Martikkala <i>et al.</i> (2023) Finlandia	Internet de las cosas (IoT)	Recolección/ Posconsumo	El uso de IoT para optimizar rutas y aumentar la eficiencia de la cadena de suministro de textiles usados.	Un sistema de recogida con sensores redujo el coste en un 7.4% en comparación con el sistema convencional.
Karadayi-Usta (2024) Turquía	Inteligencia artificial (IA)	Diseño de productos/ Posconsumo	Uso de aplicaciones móviles con IA y realidad aumentada.	Uso de aplicaciones que recomienden la ropa apropiada y evitar consumos innecesarios.
Remme <i>et al.</i> (2022) Noruega	Blockchain (Bc)	Diseño de productos/ Posconsumo	Etiquetado de sostenibilidad basado en Bc y comportamiento de compra de los consumidores al adquirir productos de moda.	El etiquetado basado en Bc puede generar valor tanto para los consumidores como para las empresas.

Continúa ►

Tabla 2. Resumen de la información de los 14 artículos seleccionados en la revisión (continuación).

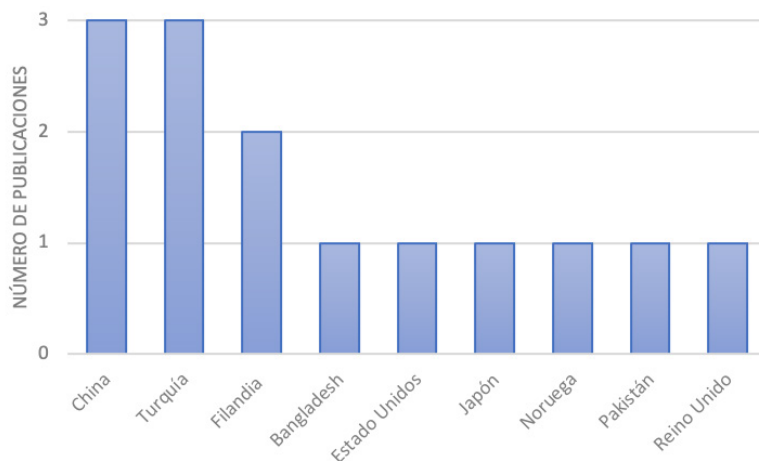
Fuente/País	Tipo de tecnología	Etapas de ITM / Tipo de residuo	Aplicación	Beneficios
Jiang <i>et al.</i> (2023) China	Blockchain (Bc)	Recolección/ Posconsumo	Registro y almacenamiento de datos de la gestión de residuos.	La aplicación de Bc garantiza la trazabilidad y la autenticidad de la logística de residuos, previene el fraude y la evasión fiscal.
Dursun <i>et al.</i> (2023) Turquía	Blockchain (Bc)	Disposición/ Posconsumo	Comprender cómo perciben los profesionales la implementación de Bc en la gestión de residuos.	Se considera un avance tecnológico importante para los actores del sector textil, facilitando la gestión de residuos.
Chowdhury <i>et al.</i> (2023) Bangladesh	Internet de las cosas (IoT)	Recolección/ Posconsumo	Proponer estrategias para la adopción de sistemas inteligentes de gestión.	Proporciona un marco práctico para que las empresas controlen y optimicen la recuperación de residuos y reduzcan sus impactos.
Ghoreishi <i>et al.</i> (2020) Finlandia	Internet de las cosas (IoT)	Diseño de productos/ Posconsumo	El uso del (IoT), impulsa la circularidad en la ITM con mejores procesos de recolección y extensión de vida de los productos.	La digitalización permite mejores estrategias de mantenimiento, reparación y reventa de prendas, alargando su ciclo de vida.
Atik <i>et al.</i> (2022) Turquía	Inteligencia artificial (IA)	Diseño de productos/ Posconsumo	La IA y el aprendizaje automático permiten predecir el desperdicio de tela.	Mejorar la gestión de recursos y la reducción de costos mediante una producción más ajustada a la realidad de cada pedido.

Fuente: Elaboración propia.

Contexto geográfico

La importancia del contexto geográfico en esta investigación acerca de las tecnologías aplicadas en la gestión de RT es crucial para comprender la variabilidad y la eficacia de las prácticas adoptadas en diferentes regiones. La figura 3 ofrece un panorama claro de la contribución por país en este campo de estudio, permitiendo reconocer algunos de los países en los cuales se ha centrado el estudio en la adopción de tecnologías en algún proceso de la ITM.

Analizando los estudios de caso de los 14 artículos revisados, se elaboró la figura 3, donde se encontró que la mayoría de los estudios relacionados

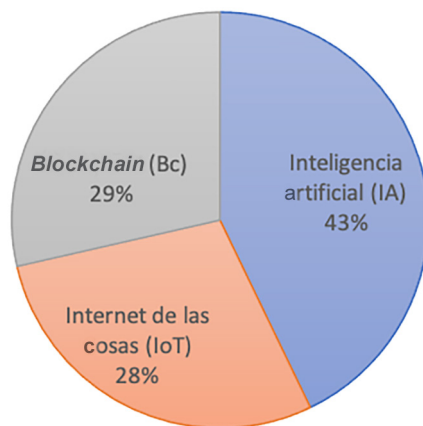
Figura 3. Aportes por país en estudios de tecnologías aplicadas a la ITM.

Fuente: Elaboración propia.

con la aplicación de tecnologías para la gestión de residuos en la ITM fue China seguido de Turquía. Lo anterior, se explica, pues China está emergiendo como un líder mundial en la aplicación de la tecnología *blockchain* para mejorar la transparencia y la sostenibilidad dentro de sus cadenas de suministro de textiles y prendas de vestir (Zhang *et al.* 2024; Gong *et al.* 2022). Por otra parte, la industria textil turca está adoptando cada vez más tecnologías de inteligencia artificial e IoT para promover prácticas de economía circular y optimizar los procesos de gestión de residuos, como clasificación, seguimiento, análisis de datos de reciclaje, entre otros (Karadayi-Usta 2024; Dursun *et al.* 2023).

Tecnologías aplicadas en la gestión de RT

La figura 4 muestra cómo las tecnologías examinadas en la literatura son la inteligencia artificial con un 43% indicando la prioridad de buscar una mayor automatización de los procesos y toma de decisiones, seguido de esta se encuentra el *blockchain* con 29% la cual se enfoca más en un análisis de las etapas de la cadena de producción de la ITM para crear mejoras al instante y, finalmente, el Internet de las cosas con 28%, el cual facilita la comunicación entre dispositivos y el intercambio de información. A continuación se desglosa a profundidad cada una de estas tecnologías y se hace énfasis en sus beneficios y barreras, según lo analizado de los estudios revisados.

Figura 4. Tecnologías aplicadas en la gestión de residuos textiles.

Fuente: Elaboración propia.

Inteligencia artificial (IA)

La IA como herramienta para la gestión de residuos tiene distintas áreas de aplicación dentro de la cadena de producción de la ITM: disposición y diseño del producto, esto con énfasis en lo que son los residuos posconsumo, es decir, para facilitar su recuperación o reutilización; por otra parte, también se aplica para procesos como análisis de demanda de producto, identificación y clasificación de un producto como reutilizable o reciclable, esto crea trabajos precisos y eficiencia en los procesos, volviéndolos automáticos (Tian *et al.* 2024; Spyridis *et al.* 2024).

Dentro de la optimización del diseño de productos, el uso de IA permite predecir los patrones de consumo e incluso disminuir el desperdicio de tela a través de conocer la demanda (Atik *et al.* 2022), además de que casos como el mencionado por Karadayi-Usta (2024), respecto a aplicaciones móviles con IA, pueden recomendar la ropa apropiada para el consumidor, con base en su gusto, y esto previene compras innecesarias.

En resumen, el uso de IA permite mejorar la gestión de residuos, en primera instancia reduciendo el desperdicio de ropa y, en segunda, optimizando procesos de clasificación de los residuos para su recuperación.

Por otra parte, la aplicación de esta herramienta también presenta algunas desventajas como lo es la programación de sistemas complejos de clasificación de residuos, pues en ocasiones pueden tenerse múltiples condiciones para clasificar un artículo como reutilizable o reciclable, como por ejemplo, color, deformación, oclusión en la prenda, lo cual dificultaría la precisión del modelo de IA

(Tian *et al.* 2024). Otra desventaja, ligada a la anterior, es la necesidad de datos de calidad, pues si se quieren datos precisos y beneficios, debe alimentarse la base de datos con información actualizada en tiempo real, de otra forma la eficiencia de la IA se vería limitada (Mizunuma *et al.* 2024).

En cuestión de costos, la aplicación de IA en procesos de la ITM dependerá del tipo de resultado que se quiera obtener, es decir, si se busca automatizar toda la cadena de producción, o si solo será en un proceso en específico, tal como se muestra en los estudios revisados, los cuales, en su mayoría, se enfocan en la disposición o recolección de artículos. Además de verse los costos y accesibilidad afectados, igualmente, por el tamaño de la empresa.

Internet de las cosas (IoT)

El IoT tiene como propósito interconectar varios dispositivos y objetos a través de Internet, permitiendo la recopilación e intercambio de información. En la ITM se emplea para rastrear y monitorear el ciclo de vida de los productos textiles, lo cual facilita el seguimiento de los RT desde su producción hasta su disposición final, como lo es la producción ajustada a la realidad de cada pedido (Ghoreishi *et al.* 2020) o la creación de sistemas de recolección inteligentes, siendo esta última la mayor abordada en los estudios analizados.

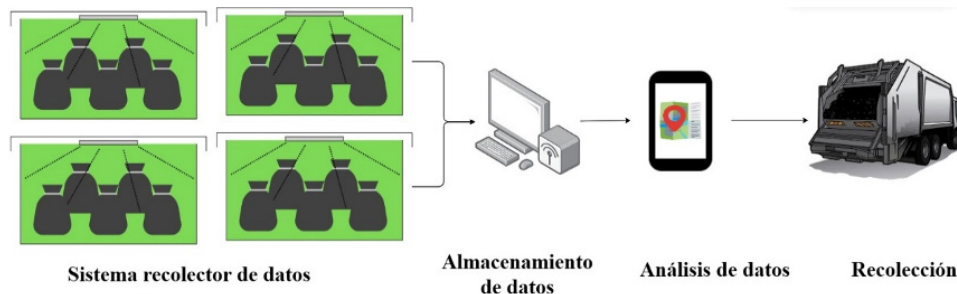
La parte esencial de estos sistemas de recolección inteligentes basados en el IoT reside en la adquisición y gestión de información proporcionada por fuentes externas, específicamente por sensores instalados en contenedores de RT. Los sensores utilizados en los contenedores están equipados con conexión inalámbrica, permitiéndoles enviar de manera remota la información recopilada. Esto posibilita conocer en tiempo real la cantidad de residuos acumulados y transmitir estos datos a un dispositivo de almacenamiento encargado de su procesamiento (Chowdhury *et al.* 2023). La función de la IoT dentro de las rutas inteligentes es interconectar la ubicación de los distintos contenedores y conocer su ubicación para, a partir de eso, diseñar la ruta más eficiente para recolectar la mayor cantidad de residuos en un solo trayecto (Martikkala *et al.* 2023). Las etapas que integran la monitorización de contenedores y recolección de RT con la aplicación del IoT son:

1. Sistema recolector de datos: uso de sensores, los cuales recopilan información sobre el llenado de los contenedores, ya sea en términos de peso o volumen. Posteriormente, se envía la información y ubicación por conexión inalámbrica.
2. Almacenamiento de datos: un dispositivo receptor almacena los datos proporcionados por los sensores conectados vía remota para su interpretación inmediata.

3. Análisis de datos: los datos son enviados a un servidor funcionando con IA, el cual procesa los datos almacenados para planificar rutas de recolección eficientes.
4. Recolección: los equipos de recolección siguen las rutas designadas por la IA para recoger los residuos de manera eficiente.

En la figura 5 se muestra cómo se enlazan cada una de las etapas para crear sistemas inteligentes de recolección. En los casos revisados, la aplicación del IoT demuestra que las rutas de recolección creadas con esta tecnología permiten además de una eficiencia en el tiempo promedio de recolección, una minimización de las distancias de recorrido, lo cual significa un ahorro en la cantidad de combustible por parte de los camiones recolectores (Addas *et al.* 2024; Castiglione *et al.* 2023).

Figura 5. Descripción del funcionamiento del sistema IoT en la recolección de RT.



Fuente: Adaptado de Martikkala *et al.* (2023).

Dentro de las desventajas, se encuentra el mantenimiento recurrente, en especial en el uso de contenedores inteligentes, pues los sensores requieren cambios de batería para seguir conectados a la red wifi y poder continuar con su funcionalidad (Martikkala *et al.* 2023), además, pueden dañarse con el manejo brusco del contenedor y la exposición a la intemperie. Por otra parte, para crear sistemas inteligentes de gestión de RT se necesita soporte técnico, sistema de monitoreo y control, plan de inversión sostenible, creación de red transparente, programa de formación pública, promoción y participación comunitaria, normas de gestión de residuos, conectividad inalámbrica y seguridad de los datos (Chowdhury *et al.* 2023), por lo cual, la inversión en esta herramienta es alta.

Tecnología *blockchain* (Bc)

El uso de la tecnología Bc puede utilizarse para registrar información sobre la procedencia de los materiales, la calidad de la fabricación y otros datos críticos. Esto facilita la identificación y gestión de residuos textiles durante su transcurso por cada una de las etapas de la ITM, tanto para supervisar los residuos preconsumo como los posconsumo.

Dentro de los estudios analizados, se identificó que su aplicación es en la mejora de la trazabilidad de residuos; complementándose con otra herramienta como la IoT, se garantiza la autenticidad y trazabilidad de los datos en la logística de residuos textiles, además de poderse prevenir un posible fraude y la evasión fiscal en el manejo de estos (Jiang *et al.* 2023).

También, con el Bc se facilitan los ajustes en tiempo real y se reducen las pérdidas por retraso, facilitando la simetría en los datos (Nuttah *et al.* 2023), esto mediante la recolección de datos de cada una de las maquinarias de la ITM, mejorando los tiempos de producción, la cantidad de material utilizado, el análisis del tipo de material empleado, conocer la calidad del material, verificar el armado de las prendas y evitar los tiempos de inactividad, incentivando de esta forma a los fabricantes a mejorar la sostenibilidad de sus productos (Remme *et al.* 2022).

Otra de las aportaciones que tiene la adopción de Bc es la prolongación de utilidad de los productos a través de acciones de recuperación, reparación y fabricación, con el objetivo principal de crear servicios con mínima generación de residuos, siendo una buena opción para tratar la problemática existente en la ITM (Khan *et al.* 2023; Papamichael *et al.* 2023).

Al igual que las otras dos tecnologías, el Bc presenta algunas barreras como desafíos en la implementación, pues no todos los actores en la cadena de suministro están preparados o dispuestos a adoptar esta tecnología (Dursun *et al.* 2023). La adopción de Bc a gran escala implica altos costos iniciales en especial para mercados con ganancias reducidas, lo cual dificulta la integración de esta tecnología a sus procesos.

Conclusión

La IA ha demostrado una capacidad para optimizar la clasificación de los RT, además de predecir los desperdicios en la producción y ofrecer recomendaciones personalizadas para reducir el consumo innecesario, lo anterior a través del uso de aplicaciones que emplean esta herramienta, la cual facilita la identificación de estrategias para extender la vida útil de las prendas y fomentar prácticas de producción y consumo más responsables. No obstante, persisten desafíos técnicos como la clasificación precisa ante complejidades visuales, así como barreras de costos de implementación y la necesidad de datos de alta calidad.

Se identificó que el IoT impulsa la eficiencia en la recolección y gestión de residuos textiles, además de facilitar el monitoreo en tiempo real de contenedores, para su posterior recolección mediante rutas inteligentes, optimizando el tiempo y el traslado. Sin embargo, su adopción a gran escala se ve limitada por la necesidad de infraestructura tecnológica avanzada, problemas de interoperabilidad entre dispositivos y preocupaciones relacionadas con la privacidad y la seguridad de los datos.

Por su parte, el Bc emerge como una tecnología clave en el sentido de poder asegurar la transparencia, la trazabilidad y la autenticidad en los procesos de gestión de residuos textiles. No obstante, sus altos costos de adopción, la falta de estandarización y la resistencia al cambio por parte de los actores del sector, son algunos de los impedimentos para su adopción en la ITM.

A pesar de estas limitaciones, la integración de IA, IoT y Bc ofrece una oportunidad única para cerrar el ciclo de los textiles en búsqueda de una verdadera economía circular, por lo cual, la combinación de estas tecnologías no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también posibilita la transformación de la ITM hacia modelos de producción y consumo sustentables y responsables. **D**

Referencias

- Abdulla, H. 2023. Week in review: tackling textile waste – The gift that keeps giving. *Just Style*, 20 de marzo. <https://www.just-style.com/news/week-in-review-tackling-textile-waste-the-gift-that-keeps-giving/>.
- Addas, A., Khan, M. N. y Naseer, F. 2024. Waste management 2.0 leveraging Internet of things for an efficient and eco-friendly smart city solution. *PLOS ONE*, 19(7): e0307608. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0307608>.
- Atik, C., Kut, A., Birant, D. y Birol, S. 2022. Prediction of cloth waste using machine learning methods in the textile industry. *2022 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE)*, 165-169. <https://doi.org/10.1109/ICEEE55327.2022.9772517>.
- Calzolari, T., Genovese, A. y Brint, A. 2022. Circular economy indicators for supply chains: a systematic literature review. *Environmental and Sustainability Indicators*, 13: 100160. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2021.100160>.
- Castiglione, A., Cimmino, L., Di Nardo, M. y Murino, T. 2023. A framework for achieving a circular economy using the blockchain technology in a sustainable waste management system. *Computers and Industrial Engineering*, 180: 109263. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109263>.
- Chowdhury, N. R., Paul, S. K., Sarker, T. y Shi, Y. 2023. Implementing smart waste management system for a sustainable circular economy in the textile industry. *International Journal of Production Economics*, 262: 108876. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108876>.

- Dursun, E., Ulker, Y. y Gunalay, Y. 2023. Blockchain's potential for waste management in textile industry. *Management of Environmental Quality: an International Journal*, 34(4): 1174-1197. <https://doi.org/10.1108/MEQ-03-2022-0085>.
- Echeverria, C. A., Handoko, W., Pahlevani, F. y Sahajwalla, V. 2019. Cascading use of textile waste for the advancement of fibre reinforced composites for building applications. *Journal of Cleaner Production*, 208: 1524-1536. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.227>.
- Ghoreishi, M., Happonen, A. y Pynnönen, M. 2020. *Exploring industry 4.0 technologies to enhance circularity in textile industry: role of internet of things*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.3471421>.
- Gong, Y., Zhang, Y. y Alharithi, M. 2022. Supply chain finance and blockchain in operations management: a literature review. *Sustainability*, 14(20): 13450. <https://doi.org/10.3390/su142013450>.
- Hader, M., Tchoffa, D., Mhamedi, A. E., Ghodous, P., Dolgui, A. y Abouabdellah, A. 2022. Applying integrated blockchain and Big Data technologies to improve supply chain traceability and information sharing in the textile sector. *Journal of Industrial Information Integration*, 28: 100345. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100345>.
- IBM. S.f. *¿Qué es la industria 4.0?* IBM. <https://www.ibm.com/mx-es/topics/industry-4-0>.
- Jiang, P., Zhang, L., You, S., Fan, Y. V., Tan, R. R., Klemeš, J. J. y You, F. 2023. Blockchain technology applications in waste management: overview, challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 421: 138466. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138466>.
- Karadayi-Usta, S. 2024. Role of artificial intelligence and augmented reality in fashion industry from consumer perspective: sustainability through waste and return mitigation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 133: 108114. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108114>.
- Khan, M. I., Wang, L. y Padhye, R. 2023. Textile waste management in Australia: a review. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 18: 200154. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2023.200154>.
- Laskurain-Iturbe, I., Arana-Landín, G., Landeta-Manzano, B. y Uriarte-Gallastegi, N. 2021. Exploring the influence of industry 4.0 technologies on the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 321: 128944. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128944>.
- Martikkala, A., Mayanti, B., Helo, P., Lobov, A. e Ituarte, I. F. 2023. Smart textile waste collection system – Dynamic route optimization with IoT. *Journal of Environmental Management*, 335: 117548. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117548>.
- Mirandona, E. A., Etxebarria, X. B. y Tola, E. M. 2007. Regionalización y estrategias de localización en el sector textil y de la confección: el caso de la Unión

- Europea ampliada. *Revista de Economía Mundial*, 16: 143-167. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86601607>.
- Mizunuma, C., Ikeya, T., Kurosaki, H., Okumura, N., Kami, Y. y Hanada, M. 2024. A construction of the data set and background removal identifier for classification of used clothes. *Procedia Computer Science*, 246: 2062-2070. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.09.651>.
- Nuttah, M. M., Roma, P., Lo Nigro, G. y Perrone, G. 2023. Understanding block-chain applications in industry 4.0: from information technology to manufacturing and operations management. *Journal of Industrial Information Integration*, 33: 100456. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100456>.
- Nyika, J. y Dinka, M. 2022. Sustainable management of textile solid waste materials: the progress and prospects. *Materials Today: Proceedings*, 62: 3320-3324. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.241>.
- Papamichael, I., Voukkali, I., Loizia, P., Rodríguez-Espinosa, T., Pedreño, J. N. y Zorapas, A. A. 2023. Textile waste in the concept of circularity. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 32: 100993. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.100993>.
- Remme, A.-M. R., Stange, S.-M., Fagerstrøm, A. y Lasrado, L. A. 2022. Blockchain-enabled sustainability labeling in the fashion industry. *Procedia Computer Science*, 196: 280-287. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.12.015>.
- Sandin, G. y Peters, G. M. 2018. Environmental impact of textile reuse and recycling – A review. *Journal of Cleaner Production*, 184: 353-365. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.266>.
- Schmutz, M. y Som, C. 2022. Identifying the potential for circularity of industrial textile waste generated within Swiss companies. *Resources, Conservation and Recycling*, 182: 106132. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106132>.
- Shirvanimoghaddam, K., Motamed, B., Ramakrishna, S. y Naebe, M. 2020. Death by waste: fashion and textile circular economy case. *Science of the Total Environment*, 718: 137317. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137317>.
- Spyridis, Y., Argyriou, V., Sarigiannidis, A., Radoglou, P. y Sarigiannidis, P. 2024. Autonomous ai-enabled industrial sorting pipeline for advanced textile recycling. *2024 20th International Conference on Distributed Computing in Smart Systems and the Internet of Things (DCOSS-IoT)*, 455-461. <https://doi.org/10.1109/DCOSS-IoT61029.2024.00073>.
- Tian, R., Lv, Z., Fan, Y., Wang, T., Sun, M. y Xu, Z. 2024. Qualitative classification of waste garments for textile recycling based on machine vision and attention mechanisms. *Waste Management*, 183: 74-86. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.04.040>.
- Wang, X.-Y. y Sun, Y. 2024. An AI-powered wardrobe donation and exchange platform using artificial intelligence and computer vision. *Proceedings of the 2024 4th International Conference on Internet and E-Business*, 34-39. <https://doi.org/10.1109/ICEB57720.2024.00011>.

doi.org/10.1145/3690001.3690021.

Zhang, X., Zheng, H. y Zheng, X. 2024. Impact of government fund policy and block-chain technology on closed-loop supply chains in textile and apparel industry. *Journal of Cleaner Production*, 434: 140037. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140037>.