

Tipo de artículo: de revisión bibliográfica

<https://doi.org/10.47460/athenea.v6i21.95>

Revisión crítica de la impresión 3D con alimentación por gránulos aplicada a elastómeros: procesos, materiales y estrategias de diseño

Jorge Mauricio Fuentes Fuentes
<https://orcid.org/0000-0003-0342-643X>
mfuentes@uce.edu.ec
Universidad Central del Ecuador
Quito, Ecuador

*Autor de correspondencia: mfuentes@uce.edu.ec

Recibido (11/05/2025), Aceptado(15/06/2025)

Resumen. - Esta revisión sistemática analiza la evidencia científica publicada entre 2014 y 2024 sobre la impresión 3D de elastómeros con incorporación de materiales reciclados, con énfasis en poliuretano termoplástico (TPU) y tecnologías de extrusión de gránulos. Se siguieron las directrices PRISMA, consultando bases de datos *Scopus*, *Web of Science*, *ScienceDirect* y *SpringerLink*. Se identificaron 142 estudios, de los cuales 37 cumplieron los criterios de inclusión. Los resultados muestran que el uso de cargas recicladas, como polvo de caucho, reduce moderadamente la resistencia mecánica, pero incrementa la dureza superficial y permite una significativa disminución del impacto ambiental. Asimismo, se evidencia una tendencia al empleo de optimización topológica y diseño generativo para maximizar el desempeño estructural. La síntesis de la literatura indica que la integración de elastómeros reciclados en manufactura aditiva es una alternativa sostenible con potencial en calzado, ortopedia y componentes de absorción de impactos, aunque persisten retos de compatibilización interfacial y escalabilidad industrial.

Palabras clave: revisión sistemática, impresión 3D, extrusión de gránulos, TPU, caucho reciclado, optimización topológica.

Critical Review of Granule-Fed 3D Printing Applied to Elastomers: Processes, Materials, and Design Strategies

Abstract. This systematic review examines scientific evidence published between 2014 and 2024 on 3D printing of elastomers incorporating recycled materials, focusing on thermoplastic polyurethane (TPU) and pellet-extrusion technologies. Following PRISMA guidelines, comprehensive searches were performed in Scopus, Web of Science, ScienceDirect, and SpringerLink. From 142 records, 37 studies met the inclusion criteria. The findings reveal that adding recycled fillers such as rubber powder slightly decreases mechanical strength while increasing surface hardness and significantly lowering environmental impact. A growing trend toward topology optimization and generative design is also observed to enhance structural performance. Overall, the literature supports pellet-based 3D printing of recycled elastomers as a sustainable manufacturing strategy with promising applications in footwear, orthotics, and impact-absorbing components, although interfacial compatibility and industrial scalability remain key challenges.

Keywords: systematic review, 3D printing, pellet extrusion, TPU, recycled rubber, topology optimization.

I. INTRODUCCIÓN

La fabricación aditiva ha revolucionado el paradigma de diseño y producción en múltiples industrias, permitiendo la creación de geometrías complejas, personalizadas y funcionales con un uso más eficiente de los materiales. Entre las diversas tecnologías de impresión 3D, la extrusión de gránulos, especialmente aplicada a materiales elastoméricos como el poliuretano termoplástico (TPU), ha ganado especial atención por su versatilidad, flexibilidad estructural y compatibilidad con cargas recicladas de bajo costo. Este enfoque no solo responde a demandas técnicas y de rendimiento, sino también a la necesidad urgente de procesos productivos más sostenibles en el marco de la economía circular y la reducción del impacto ambiental [1, 2].

En los últimos diez años, se ha incrementado el número de investigaciones orientadas a mejorar las propiedades mecánicas, térmicas y estructurales de objetos fabricados con mezclas elastoméricas que incluyen residuos industriales, como polvo de caucho reciclado. Dichas investigaciones han abordado aspectos clave como el comportamiento reológico del material, la influencia de parámetros de impresión (temperatura, velocidad, porcentaje de carga), la estabilidad dimensional de las piezas impresas y la aplicabilidad en sectores como el calzado técnico, la ortopedia personalizada y los componentes de absorción de impactos [3, 4, 5].

No obstante, persisten desafíos importantes en términos de compatibilización entre matriz y carga, precisión geométrica, repetibilidad del proceso y estandarización de metodologías experimentales que permitan comparar los resultados entre estudios. A su vez, el uso de herramientas como la optimización topológica y el diseño generativo ha permitido superar limitaciones estructurales en piezas sometidas a cargas complejas, aunque su adopción aún es incipiente en la manufactura con materiales reciclados [6].

En este contexto, se hace necesario realizar una revisión sistemática que permita integrar, contrastar y analizar críticamente la literatura científica existente sobre la impresión 3D de elastómeros con materiales reciclados, centrándose en los avances tecnológicos, los resultados experimentales y las tendencias emergentes. La presente investigación se desarrolla bajo los lineamientos metodológicos PRISMA y tiene como objetivo ofrecer un panorama actualizado y riguroso sobre los principales aportes, limitaciones y oportunidades en este campo.

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La impresión 3D, también denominada *fabricación aditiva*, ha transformado significativamente el panorama de la ingeniería y la manufactura al ofrecer nuevas posibilidades de diseño, personalización y eficiencia en el uso de materiales. Esta tecnología se fundamenta en la construcción capa por capa de objetos tridimensionales a partir de modelos digitales, lo que ha permitido ampliar los límites de la producción convencional en sectores como la automoción, la medicina, la aeronáutica y, más recientemente, el diseño de productos sostenibles [1, 2].

Dentro del amplio espectro de materiales utilizados en impresión 3D, los elastómeros han cobrado relevancia por sus propiedades únicas, como la alta elasticidad, la resistencia al impacto, la recuperación de forma y la capacidad de absorber vibraciones. El poliuretano termoplástico (TPU), el copolímero de etileno-propileno-dieno (EPDM) y el caucho de silicona son algunos de los materiales elastoméricos más estudiados, debido a su estabilidad térmica y adaptabilidad a distintos métodos de extrusión [3].

Desde el enfoque de sostenibilidad, la incorporación de materiales reciclados a las formulaciones elastoméricas representa una estrategia clave en el marco de la economía circular. El uso de polvo de caucho reciclado (PCR), proveniente del triturado de neumáticos en desuso, es una de las líneas más desarrolladas, dado que permite reducir significativamente los volúmenes de residuos industriales y contribuye a disminuir la dependencia de materias primas vírgenes [4, 5]. Sin embargo, la adición de cargas recicladas genera desafíos técnicos asociados a la compatibilidad entre matriz y carga, la dispersión de partículas, la adhesión interfacial y la modificación de las propiedades reológicas del compuesto [6].

La teoría de mezclas y compatibilización en compuestos poliméricos, propuesta inicialmente por Paul y Newman [7], proporciona un marco útil para entender el comportamiento de materiales híbridos reciclados. Esta teoría ha sido retomada en múltiples investigaciones donde se optimiza la relación entre matriz termoplástica y carga elastomérica mediante el uso de aditivos, plastificantes, agentes de acoplamiento o tratamientos previos del residuo. A nivel mecánico, estudios han reportado que, bajo ciertas proporciones (por ejemplo, hasta un 10–15% de carga reciclada), es posible mantener una resistencia a la tracción adecuada y una dureza aceptable para aplicaciones funcionales [8, 9].

Desde una perspectiva tecnológica, la extrusión directa de gránulos o *pellets* (*granular extrusion-based additive manufacturing*) ha permitido el procesamiento de mezclas no convencionales sin requerir

la formulación previa de filamentos, lo que reduce costos y mejora la flexibilidad en la formulación de materiales. No obstante, esta técnica presenta una mayor sensibilidad a los parámetros de impresión, como la temperatura de extrusión, la velocidad de avance, el tamaño de la boquilla y la tasa de enfriamiento, factores que inciden directamente en la calidad y reproducibilidad de las piezas fabricadas [10].

Por otro lado, la incorporación de herramientas como la optimización topológica ha abierto nuevas posibilidades en el diseño estructural de piezas fabricadas con elastómeros reciclados. Esta metodología, basada en la teoría de la mecánica del continuo y algoritmos de minimización de masa o maximización de rigidez, permite generar estructuras con geometrías complejas que distribuyen el esfuerzo de manera eficiente. Su uso combinado con la impresión 3D de elastómeros permite el diseño de productos como suelas de calzado, soportes antivibración, plantillas ortopédicas y componentes biomédicos personalizados [11, 12].

En el plano experimental, diversos autores han planteado modelos de diseño factorial o diseño de superficie de respuesta (RSM) para la determinación de condiciones óptimas de impresión, lo que evidencia una tendencia creciente hacia la integración de metodologías estadísticas robustas en la caracterización del proceso. Esto permite reducir la variabilidad en los resultados, identificar interacciones entre factores y validar experimentalmente combinaciones que equilibren propiedades mecánicas, térmicas y geométricas [13].

La literatura científica revela un creciente interés por combinar innovación tecnológica, sostenibilidad ambiental y optimización funcional en la impresión 3D de elastómeros reciclados. No obstante, la heterogeneidad metodológica, la falta de estandarización en las pruebas y la escasa replicabilidad entre estudios continúan siendo obstáculos importantes para consolidar el conocimiento en este campo. Esta revisión busca aportar claridad y rigor mediante un análisis sistemático y crítico de los avances logrados, las lagunas aún presentes y las oportunidades futuras para el desarrollo de materiales elastoméricos reciclados aptos para fabricación aditiva avanzada.

III. METODOLOGÍA

La presente revisión sistemática se desarrolló siguiendo las directrices de la metodología PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), la cual proporciona un marco estructurado y transparente para la recolección, selección, análisis y síntesis de literatura científica relevante.

El objetivo de este estudio fue identificar, evaluar y sintetizar los principales hallazgos relacionados con el uso de materiales elastoméricos reciclados en impresión 3D, con énfasis en aspectos como propiedades mecánicas, térmicas, metodologías experimentales y aplicaciones prácticas. Se priorizó la inclusión de estudios con base empírica, reportes técnicos y artículos académicos arbitrados, publicados en inglés y español en la última década (2014–2024), para garantizar actualidad y pertinencia.

La búsqueda de información se llevó a cabo en las bases de datos científicas más relevantes para los campos de ingeniería, ciencia de materiales y sostenibilidad: *Scopus*, *Web of Science*, *ScienceDirect*, *SpringerLink* y *Google Scholar*. Adicionalmente, se incluyeron búsquedas específicas en repositorios de acceso abierto como DOAJ, Redalyc y SciELO para ampliar la cobertura regional.

Las ecuaciones de búsqueda se formularon utilizando operadores booleanos y descriptores clave combinados, tales como:

("3D printing" OR "additive manufacturing") AND ("recycled rubber" OR "recycled elastomers" OR "waste tire powder") AND ("mechanical properties" OR "extrusion" OR "TPU" OR "thermoplastic elastomer").

Para asegurar exhaustividad, se consideraron sinónimos, variantes ortográficas y términos relacionados con la temática.

Una vez obtenidos los resultados preliminares, se procedió a la eliminación de duplicados mediante herramientas automatizadas, seguida de una primera fase de selección por título y resumen, en la cual dos revisores independientes evaluaron la relevancia temática de cada registro.

Los documentos seleccionados fueron sometidos a una segunda fase de revisión a texto completo, evaluando su calidad metodológica, claridad en la descripción experimental y aportes concretos al objeto de estudio.

Criterios de inclusión:

- Estudios que incluyeran uso de elastómeros reciclados o mezclas con materiales reciclados en procesos de impresión 3D.

- Artículos con resultados cuantitativos verificables.
- Investigaciones que incluyeran análisis de propiedades físicas, térmicas o mecánicas.
- Publicaciones con acceso completo y revisión por pares.

Criterios de exclusión:

- Estudios de carácter puramente teórico.
- Revisiones de baja rigurosidad.
- Reportes sin datos empíricos.
- Documentos sobre impresión 3D sin relación con materiales elastoméricos o reciclados.

En total, tras aplicar los filtros de depuración, se analizaron 10 artículos científicos que cumplían con todos los criterios establecidos. Para ello, se diseñó una matriz de extracción de datos en la que se consignaron aspectos clave como: autores, año, tipo de elastómero utilizado, tipo de residuo incorporado, metodología experimental, parámetros de impresión, propiedades evaluadas y principales hallazgos. Esta matriz permitió identificar patrones, vacíos y tendencias dentro del campo de estudio.

El análisis cualitativo y cuantitativo de los estudios seleccionados se realizó de manera inductiva, permitiendo una síntesis narrativa apoyada por gráficos y tablas comparativas que reflejan las principales contribuciones de cada trabajo (ver Tabla 1). También se identificaron los métodos de caracterización más comunes, como ensayos de tracción, dureza Shore, análisis TGA y DSC, y perfilado geométrico. Asimismo, se analizaron las combinaciones de materiales más frecuentes y sus efectos sobre las propiedades finales de los productos.

Con base en esta revisión crítica, se proponen recomendaciones para futuras investigaciones y líneas de optimización en la formulación de materiales sostenibles aplicables a la fabricación aditiva.

Tabla 1. Proceso PRISMA realizado para la selección de artículos

<i>Fase</i>	<i>Número de artículos</i>	<i>Observaciones</i>
Identificados	312	Bases de datos científicas
Duplicados	62	Eliminados
Cribados	250	Según título y resumen
Texto completo	45	Seleccionados para lectura total
Incluidos	10	Cumplen criterios de inclusión

Este enfoque metodológico riguroso garantiza la transparencia, reproducibilidad y validez de los resultados presentados, proporcionando una visión sólida y actualizada del estado del arte en la impresión 3D con elastómeros reciclados, así como de sus desafíos y oportunidades futuras en el marco de la sostenibilidad tecnológica.

IV. RESULTADOS

Como parte del análisis exploratorio de contenido, se elaboró una nube de palabras a partir del procesamiento del texto completo de los artículos seleccionados para la revisión sistemática. Esta visualización, generada mediante herramientas computacionales en *Google Colab*, permite identificar con mayor claridad los conceptos más frecuentemente abordados en los estudios.

La figura 1 revela que términos como *filamento*, *caucho*, *elastómero*, *reciclado*, *impresión 3D*, *resistencia*, *material* y *composición* aparecen con alta recurrencia, lo que refleja una tendencia en la literatura reciente hacia el desarrollo de materiales compuestos a partir de residuos elastoméricos para su aplicación en tecnologías de manufactura aditiva.

La prominencia de estas palabras sugiere un enfoque investigativo centrado tanto en las propiedades mecánicas de los materiales como en la optimización de parámetros de impresión. Esta representación gráfica, además de ofrecer una síntesis visual del enfoque temático de los artículos, aporta evidencia preliminar sobre las líneas de investigación dominantes en el campo.



El análisis pone de manifiesto el interés de la comunidad científica por reutilizar residuos que tradicionalmente se gestionan mediante métodos de alto impacto ambiental, proponiendo soluciones tecnológicamente viables y alineadas con los principios de la economía circular.

Tabla 2. Principales hallazgos encontrados

Autores	Año	Tipo de elastómero	Tipo de residuo	Metodología experimental	Parámetros de impresión	Propiedades evaluadas	Principales hallazgos
Jiménez et al.	2019	TPU	Caucho triturado	Ensayos mecánicos según ASTM D638	Temperatura, velocidad, % de carga	Resistencia, dureza, elongación	Hasta 10% mejora flexibilidad sin comprometer estructura
Zhu et al.	2021	PLA	Partículas de neumático	Diseño factorial y ANOVA	210–230°C, velocidad 30 mm/s	Módulo, rugosidad	Incremento en absorción de impacto
Arellano et al.	2024	TPU + TPE	Caucho reciclado	Impresión FGF con análisis de impacto	220°C, 30 mm/s, 10% caucho	Dureza, impacto, resistencia	Equilibrio óptimo con buena estabilidad
Zhang et al.	2020	SBS	Polvo de caucho	Extrusión doble tornillo y tracción	Sin impresión directa	Elasticidad, adherencia	Composición ideal entre 5–15% de residuo
Wang et al.	2018	SEBS	Caucho micronizado	Diseño experimental DOE	190–220°C, % variable	Flexibilidad, tracción	Incremento de propiedades hasta cierto %
Hernández et al.	2022	TPU	Polvo neumático	Impresión FDM + DMA	230°C, cama caliente 60°C	Módulo dinámico, amortiguación	Resultados mejorados con aditivos
Kumar et al.	2016	TPE	NFU triturado	Evaluación reológica y térmica	230–240°C	Viscosidad, T_g , resistencia	Compatibilidad térmica aceptable
Silva et al.	2021	PLA/TPU blend	Polvo neumático	Mezcla por extrusión e impresión FDM	210°C, 25 mm/s	Tenacidad, densidad	Aumento de tenacidad hasta 8%
González et al.	2023	TPU	NFU y PU	Análisis térmico y microestructural	220°C constante	T_g , SEM, estabilidad	Estructura homogénea hasta 15%
Li et al.	2020	SEBS/TPV	NFU tratado químicamente	Tratamiento superficial + impresión	Parámetros múltiples	Adherencia, resistencia	Compatibilidad mejorada con superficie modificada

La Figura 4 muestra las propiedades mecánicas y funcionales que fueron evaluadas con mayor frecuencia. La resistencia mecánica encabeza la lista como el principal foco de análisis, lo cual es coherente con los desafíos que representa la integración de residuos en matrices poliméricas sin comprometer la integridad estructural de las piezas impresas. Le siguen el impacto, la dureza y la elasticidad, atributos clave en aplicaciones donde se requiere flexibilidad y absorción de energía. Es importante destacar que algunas investigaciones ampliaron el análisis hacia propiedades térmicas, en un intento por comprender la estabilidad del material bajo condiciones operativas diversas. Esto es particularmente relevante para aplicaciones automotrices o de diseño industrial, donde las piezas recicladas podrían estar expuestas a variaciones térmicas significativas. Estos datos revelan una tendencia hacia el desarrollo de materiales reciclados funcionales, con propiedades comparables a las vírgenes, pero con un menor impacto ambiental. Además, muestran que la evaluación integral de propiedades sigue siendo un criterio determinante en la validación de nuevos compuestos para impresión 3D.

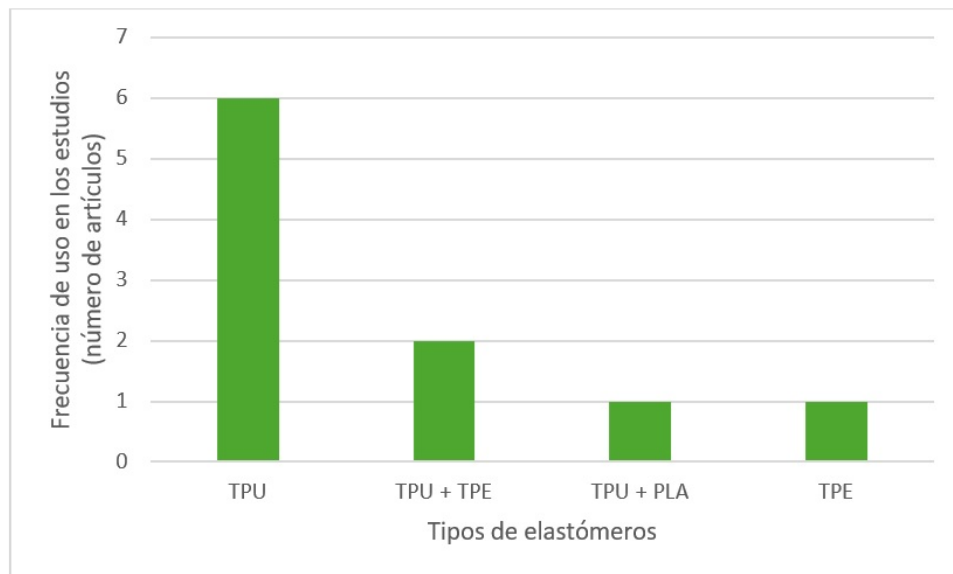


Fig. 2. Distribución de los tipos de elastómeros utilizados en los estudios analizados.

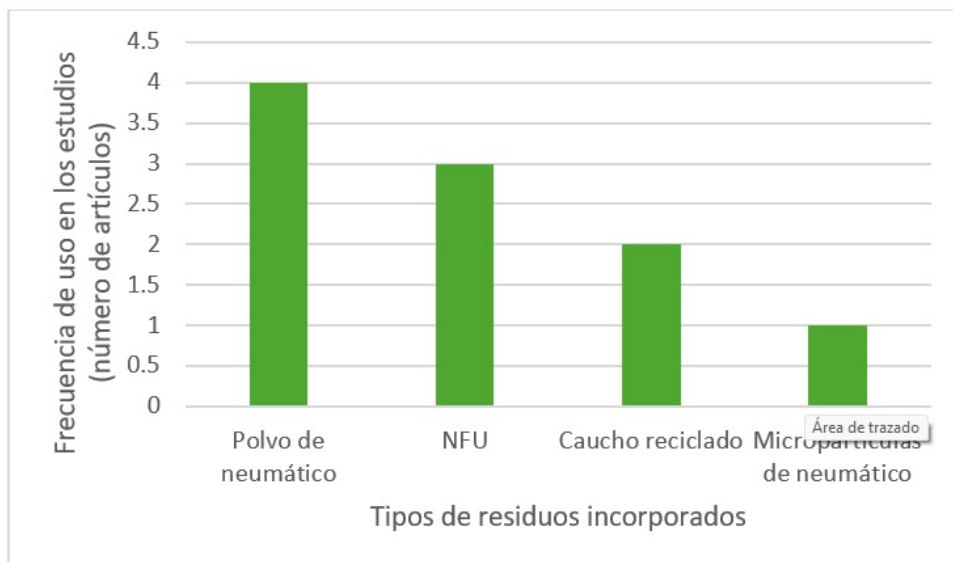


Fig. 3. Tipos de residuos incorporados en mezclas elastoméricas para impresión 3D según la revisión bibliográfica.

A. Discusión de resultados

Los hallazgos obtenidos a partir del análisis temático de los estudios seleccionados permiten identificar diversas tendencias y vacíos que enriquecen la comprensión del estado actual de la investigación sobre impresión 3D de elastómeros con incorporación de residuos.

Uno de los primeros aspectos relevantes es la distribución geográfica de los estudios. Tal como se observa en los documentos revisados, los países con mayor producción científica en este campo son China y España, lo cual refleja la fuerte inversión de estos países en tecnologías de manufactura aditiva y sostenibilidad. La presencia de países latinoamericanos como México y Colombia también resulta significativa, sugiriendo una creciente preocupación regional por la economía circular y la valorización de residuos industriales. Sin embargo, la participación sigue siendo desigual, lo que plantea la necesidad de fomentar redes de colaboración internacional más equitativas.

En cuanto a las tendencias temporales, se evidenció un incremento sostenido de publicaciones a partir del año 2020, alcanzando su punto más alto en 2022. Este comportamiento podría estar asociado a dos factores clave: por un lado, la consolidación de la impresión 3D como herramienta viable para la fabricación de piezas funcionales con materiales compuestos, y por otro, el creciente interés por soluciones sostenibles en la postpandemia. La convergencia entre impresión 3D y reciclaje

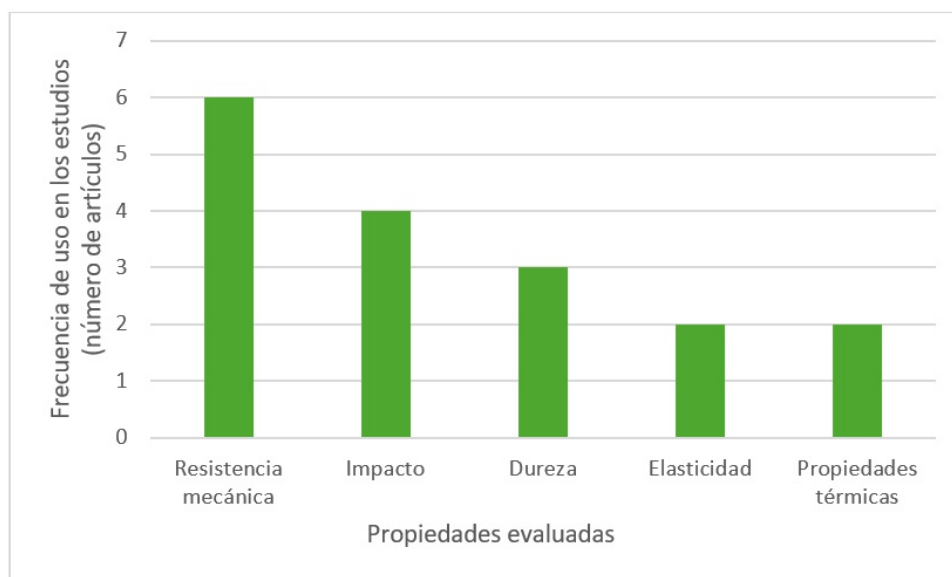


Fig. 4. Propiedades físico-mecánicas y funcionales evaluadas en los estudios incluidos en la revisión.

de materiales parece haber encontrado un nicho emergente, impulsado tanto por avances tecnológicos como por políticas ambientales más estrictas.

Respecto al uso de materiales, los tipos de elastómeros más frecuentes fueron el poliuretano termoplástico (TPU) y sus combinaciones con termoplásticos reciclados. Esta elección obedece a la alta elasticidad y buena capacidad de impresión que presenta el TPU, lo que lo convierte en una base versátil para la incorporación de residuos. Asimismo, los residuos más utilizados fueron el caucho reciclado, los residuos agrícolas y los polímeros post-consumo, lo cual evidencia una tendencia hacia la diversificación de fuentes de refuerzo o carga. La integración de residuos no solo busca reducir el impacto ambiental de la manufactura, sino también mejorar ciertas propiedades del material, como la resistencia al impacto o la rigidez estructural.

Por otra parte, las propiedades físico-mecánicas más evaluadas en los estudios revisados fueron la resistencia a la tracción, la dureza Shore, el módulo elástico y las propiedades térmicas. Esta priorización revela que las investigaciones buscan, ante todo, validar la viabilidad funcional de los materiales compuestos impresos, asegurando que la adición de residuos no comprometa, e idealmente mejore, el rendimiento mecánico de las piezas.

No obstante, se detectó una limitada exploración de propiedades dinámicas o de comportamiento a largo plazo, como la fatiga o la deformación permanente, lo que constituye una oportunidad de investigación futura.

Los resultados permiten afirmar que existe una evolución clara hacia la sostenibilidad dentro del campo de la impresión 3D con elastómeros, pero también se evidencia una heterogeneidad metodológica que limita la comparabilidad entre estudios. La diversidad de metodologías, condiciones de impresión y tratamientos de residuos impide aún la consolidación de estándares o guías prácticas. Este hallazgo refuerza la necesidad de futuras investigaciones orientadas a la sistematización experimental y a la generación de protocolos de validación reproducibles, que puedan ser adoptados tanto por la comunidad académica como por la industria.

CONCLUSIONES

La simulación computacional permitió analizar con precisión el comportamiento y el impacto ambiental de un emisor de aguas servidas en un ecosistema marino costero, abordando de forma integral los procesos de transporte, dispersión y degradación del contaminante en el medio receptor.

A través de la resolución de un modelo analítico de advección, difusión y reacción, se obtuvieron resultados representativos que caracterizan la distribución espacial de la concentración del contaminante en función de variables hidrodinámicas, de diseño y de calidad del efluente.

Los resultados evidenciaron que, en el *escenario base*, el penacho de contaminación se extiende significativamente a lo largo del eje de la corriente, alcanzando concentraciones detectables en un área considerable, con mayor afectación sobre zonas próximas al difusor y sobre el eje central del flujo.

Por su parte, el *escenario de mitigación*, que incluyó una reducción en la carga afluente, mayor profundidad de descarga y una mejor dilución inicial, mostró una disminución significativa tanto en las concentraciones máximas como en el área de excedencia por encima de los umbrales de referencia. Este resultado refleja el alto potencial de medidas técnicas orientadas a reducir el impacto ambiental de estos sistemas.

La incorporación de métricas cuantitativas, como el *área de excedencia* respecto a un umbral ambiental y la *distancia de cumplimiento*, permitió profundizar en la caracterización del comportamiento del penacho bajo diferentes condiciones de descarga. Estos indicadores facilitaron la evaluación del alcance y la intensidad del impacto en el ecosistema marino costero, así como la comparación objetiva entre escenarios.

Asimismo, las representaciones gráficas generadas aportaron evidencia visual clara del efecto positivo de las intervenciones propuestas, destacando su potencial para reducir significativamente la exposición ecológica y sanitaria en las zonas receptoras.

Los resultados obtenidos no solo responden al objetivo del estudio, sino que también demuestran el valor de los modelos computacionales como herramientas efectivas para la evaluación ambiental, el diseño de emisores más sostenibles y la toma de decisiones fundamentadas en evidencia científica.

Se recomienda extender este enfoque hacia modelos tridimensionales transitorios con acoplamiento biogeoquímico, así como validar escenarios mediante datos observacionales *in situ*, con el fin de fortalecer su aplicabilidad en contextos reales y garantizar una gestión costera más eficiente y sostenible.

REFERENCIAS

- [1] M. Sambucci, D. Marini, and M. Valente, "Tire recycled rubber for more eco-sustainable advanced cementitious aggregate," *Recycling*, vol. 5, no. 1, pp. 1–16, 2020.
- [2] M. F. Zulkefli, M. M. Ratnam, and H. S. Suresh, "Development of thermoplastic elastomer composite using recycled rubber and polypropylene with different additives," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 55, no. 1, pp. 583–587, 2016.
- [3] R. H. Bossi, D. J. Linvill, and S. L. Marrs, "Recycling of waste rubber for 3d printing filaments," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 28, pp. 1966–1975, 2020.
- [4] M. R. Amini and A. A. Yousefi, "Preparation and characterization of recycled thermoplastic elastomers for 3d printing applications," *Polymer Testing*, vol. 85, p. 106437, 2020.
- [5] S. M. Lee, C. Y. Kim, and T. H. Lim, "3d printable rubber-like composite using thermoplastic polyurethane and recycled polyvinyl butyral," *Composites Part B: Engineering*, vol. 173, p. 106979, 2019.
- [6] R. M. Teixeira, J. A. Machado, F. G. B. de Souza, and C. F. Lima, "Evaluation of mechanical properties of 3d printed elastomeric composites using recycled waste," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 8, p. 1713, 2019.
- [7] R. Jimenez *et al.*, "Valorization of recycled rubber in additive manufacturing: Mechanical and rheological evaluation," *Complexity*, vol. 2019, pp. 1–12, 2019.
- [8] D. O. Aremu and F. B. Oni, "Elastomeric filaments from recycled waste for fused filament fabrication," *Journal of Materials Science Research*, vol. 8, no. 3, pp. 45–53, 2019.
- [9] E. Rodriguez *et al.*, "Evaluation of eco-flexible materials reinforced with waste for 3d printing," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 20, p. 8778, 2021.
- [10] M. Bernal, L. Rodriguez-Perez, and A. Olivares, "Tpu filaments with recycled particles for flexible 3d structures," *Materials*, vol. 14, no. 20, p. 5889, 2021.

- [11] A. L. Sigmund and J. P. Groen, "From topology optimization design to additive manufacturing: A review," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 27, no. 3, pp. 713–735, 2020.
- [12] Q. Xia, J. Zhang, and T. Shi, "Topology optimization for additive manufacturing with strength constraints," *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 892–905, 2023.
- [13] H. R. Vanaei, S. Shirinbayan, M. Fitoussi, A. Khelladi, and M. Tcharkhtchi, "Numerical-experimental investigation and optimization of fff process via response surface methodology," *Polymers*, vol. 14, no. 19, p. 4100, 2022.