



**EVALUACIÓN DE LA RECOLECCIÓN DE LLANTAS FUERA DE USO (LFU) EN BOGOTÁ: RETOS
Y OPORTUNIDADES PARA SU APROVECHAMIENTO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS**

Jhon Jairo Cárdenas Niño

María Paula González Cuesta

Lina María Salazar Cardona

Universidad EAN

Facultad de Ingeniería

Especialización en Gerencia de Proyectos / Machine Learning

Bogotá, Colombia

2026

Evaluación de la recolección de llantas fuera de uso (LFU) en Bogotá: Retos y oportunidades para su aprovechamiento en mezclas asfálticas

Resumen

Esta investigación analiza los factores que condicionan la recolección de llantas fuera de uso en Bogotá y su potencial de aprovechamiento en mezclas asfálticas con grano de caucho reciclado. Se aplicó una metodología cualitativa documental, con un diseño de Revisión Documental Sistemática bajo los lineamientos PRISMA 2021 sobre 50 fuentes académicas, normativas e institucionales del período 2020 a 2025. El diagnóstico evidenció que la ciudad genera 4,7 millones de llantas al año, pero menos del 1% llega al procesador por el canal formal, y que el cumplimiento de la meta del 25% de grano de caucho reciclado en obras viales ronda el 5% desde 2012. Se identificaron cuatro nudos críticos: desarticulación territorial de los puntos de acopio, desalineamiento de incentivos entre actores, opacidad informacional por ausencia de trazabilidad y brecha de calidad del material.

El supuesto central quedó respaldado: la brecha tiene origen organizacional, no técnico. Como propuesta de mejora, se formularon tres componentes interdependientes fundamentados en el estándar P5 del GPM Global: protocolo conjunto IDU-SDA con metas verificables por localidad, sistema de registro unificado de aplicación progresiva y preferencia contractual por material con trazabilidad verificada. Se concluye que la intervención requerida es de coordinación y trazabilidad sobre la plataforma normativa vigente.

Palabras clave

Llantas fuera de uso, grano de caucho reciclado, logística inversa, gobernanza, trazabilidad, economía circular.

Evaluación de la recolección de llantas fuera de uso (LFU) en Bogotá: Retos y oportunidades para su aprovechamiento en mezclas asfálticas

Abstract

This study analyzes the factors that condition the collection of end-of-life tires (ELT) in Bogotá and their potential use in asphalt mixtures with recycled rubber crumb (RRC). The research applied a qualitative documentary methodology, with a Systematic Documentary Review design under PRISMA 2021 guidelines on 50 academic, regulatory, and institutional sources published between 2020 and 2025. The diagnosis revealed that the city generates 4.7 million tires per year, yet less than 1% reaches the processor through the formal channel, and compliance with the 25% RRC target for road works has hovered around 5% since 2012. Four critical bottlenecks were identified: territorial fragmentation of collection points, misalignment of incentives among actors, informational opacity due to the absence of traceability, and material quality gaps.

The central assumption was supported: the gap is organizational, not technical. As an improvement proposal, three interdependent components were formulated, grounded in the GPM Global P5 standard: a joint IDU-SDA protocol with verifiable targets by locality, a unified registration system for progressive implementation, and contractual preference for material with verified traceability. The required intervention involves coordination and traceability built on the existing regulatory framework.

Keywords

Tires out of use, recycled rubber crumb, reverse logistics, governance, traceability, circular economy.

Evaluación de la recolección de llantas fuera de uso (LFU) en Bogotá: Retos y oportunidades para su aprovechamiento en mezclas asfálticas

Contenido

Introducción	8
Objetivos	12
Objetivo general	12
Objetivos específicos	12
Justificación	13
Marco teórico	15
Gestión de LFU	15
Mezclas asfálticas con granulado de caucho reciclado	16
Logística inversa aplicada a LFU	16
Economía circular aplicada a LFU	17
Informalidad en cadenas de suministro de residuos	17
Trazabilidad y sistemas de información en la gestión posconsumo	18
Análisis bibliométrico	18
Metodología	23
Enfoque y alcance de la investigación	23
Población y muestra	24
Variables de análisis	26
Estado del sistema de recolección de LFU en Bogotá (2020–2025)	26
Factores condicionantes del sistema de recolección	26
Marco normativo e institucional	27
Potencial de aprovechamiento de LFU en mezclas asfálticas con GCR	27
Instrumentos	28
<i>Protocolo de búsqueda y selección documental</i>	28
<i>Matriz de análisis documental</i>	28
<i>Técnicas para el análisis de la información</i>	29
<i>Análisis de contenido cualitativo</i>	29
<i>Análisis comparado de experiencias</i>	29
<i>Triangulación de fuentes</i>	29
<i>Supuestos de investigación</i>	30
Diagnóstico	30
<i>Estado del sistema de recolección de LFU en Bogotá (2020–2025)</i>	31
<i>Factores condicionantes del sistema de recolección</i>	33
<i>Marco normativo e institucional</i>	34
<i>Potencial de aprovechamiento de LFU en mezclas asfálticas con GCR</i>	36
Herramienta de machine learning aplicada al diagnóstico: análisis de las fuentes documentales de investigación mediante TF-IDF y K-means	37

Evaluación de la recolección de llantas fuera de uso (LFU) en Bogotá: Retos y oportunidades para su aprovechamiento en mezclas asfálticas

<i>Nudos críticos del sistema</i>	39
Análisis de resultados	40
Retos y oportunidades del sistema	40
Triangulación de fuentes	42
Contraste del supuesto central	43
Ejes de intervención y marco de sostenibilidad	43
Propuesta	45
Mejora para el sistema de recolección de LFU en Bogotá	45
<i>Gobernanza del flujo y coordinación interinstitucional</i>	45
<i>Trazabilidad verificable del flujo de material</i>	47
<i>Incentivos alineados para operadores formales</i>	50
Conclusiones	54
Referencias	56

Evaluación de la recolección de llantas fuera de uso (LFU) en Bogotá: Retos y oportunidades para su aprovechamiento en mezclas asfálticas

Lista de Figuras

Figura 1 Documentos clasificados según el patrocinador de financiamiento	19
Figura 2 Documentos por autor	20
Figura 3 Distribución de los documentos según el área temática	21
Figura 4 Tendencia de publicaciones por año (2003–2025).	22
Figura 5 Brecha entre generación y recolección formal de LFU en Bogotá	32
Figura 6 Destino del material LFU en Bogotá.....	33
Figura 7 Comparativo internacional de cumplimiento de metas de recolección de LFU	36
Figura 8 Análisis de las fuentes documentales – TF-IDF con K-means.....	38
Figura 9 Ciclo de interdependencia de los nudos críticos del sistema de recolección de LFU en Bogotá	39
Figura 10 Convergencias entre fuentes académicas, normativas e institucionales	42
Figura 11 Integración de los componentes de la propuesta con el estándar P5 del GPM Global	45

Evaluación de la recolección de llantas fuera de uso (LFU) en Bogotá: Retos y oportunidades para su aprovechamiento en mezclas asfálticas

Lista de Tablas

Tabla 1 Criterios de inclusión y exclusión de las fuentes documentales	25
Tabla 2 Variables de análisis y su relación con los objetivos específicos de la investigación	28
Tabla 3 Factores condicionantes del sistema de recolección de LFU en Bogotá	34
Tabla 4 Referentes internacionales en gestión de LFU y aprovechamiento asfáltico	35
Tabla 5 Barreras para la implementación masiva del GCR en mezclas asfálticas	37
Tabla 6 Retos y oportunidades del sistema de recolección de LFU en Bogotá	41
Tabla 7 <i>Contraste entre el supuesto central de investigación y la evidencia documental</i>	43
Tabla 8 Ejes de intervención y su interdependencia en el sistema de recolección de LFU en Bogotá	44
Tabla 9 Integración del Componente 1 con el estándar P5 del GPM Global	47
Tabla 10 Integración del Componente 2 con el estándar P5 del GPM Global	49
Tabla 11 Integración del Componente 3 con el estándar P5 del GPM Global	52

Introducción

Cada año el mundo descarta más de mil millones de llantas. El caucho vulcanizado con el que están fabricadas puede permanecer intacto por más de cinco siglos sin degradarse, lo que convierte su acumulación en uno de los nudos más persistentes de la gestión ambiental urbana (Goevert, 2024). Los estudios que han abordado este problema desde la ingeniería se han concentrado casi en su totalidad en una solución técnica concreta: obtener granulado de caucho reciclado (GCR) por trituración de llantas usadas e incorporarlo en mezclas asfálticas, lo que mejora el comportamiento mecánico del pavimento y extiende su vida útil (Martínez-Arguelles et al., 2018; Goevert, 2024). Esa línea de investigación lleva más de dos décadas produciendo resultados consistentes, y el análisis de la base Scopus para el período 2003-2023 confirma que sigue creciendo. La pregunta previa sigue abierta: cómo asegurar que el material llegue al procesador en condiciones adecuadas. Ese supuesto, que el cuello de botella es organizacional antes que tecnológico, está documentado de forma fragmentada para América Latina y prácticamente ausente para el caso bogotano en el período reciente (Goevert, 2024; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS], 2022).

Colombia no está al margen de esa dinámica: genera cerca de 61.000 toneladas de llantas fuera de uso (LFU) cada año, y una fracción considerable de ese volumen termina en condiciones de acumulación no gestionada, con efectos directos sobre la calidad ambiental de las comunidades (MADS, 2022). Mediante la Resolución 1326 de 2017, el MADS respondió a ese panorama trasladando a productores e importadores la obligación de hacerse cargo de las llantas que ponen en circulación, con metas de acopio que debían crecer año a año de forma verificable (MADS, 2017). La norma existe, pero su aplicación ha sido desigual: los puntos de acopio autorizados tienen cobertura insuficiente en zonas periféricas, los gestores informales mueven una parte del flujo sin ningún registro, y el mercado del GCR procesado opera con

márgenes tan ajustados que apenas entre el 50% y el 60% del material producido encuentra comprador, lo que desalienta cualquier ampliación de capacidad instalada (El Tiempo, 2016).

Bogotá tiene una trayectoria propia en este campo. El Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) empezó a incorporar GCR en la malla vial desde 2001 y once años después lo convirtió en exigencia contractual: cualquier obra licitada debe incluir al menos un 5% de mezcla modificada con caucho reciclado, y la proyección institucional apunta al 25% (Martínez-Arguelles et al., 2018). Más de noventa tramos viales de la ciudad han sido intervenidos con esta tecnología, y la evidencia acumulada, parte de ella producida por la Universidad de los Andes, indica que el pavimento resultante resiste mejor la fatiga y tiene mayor vida útil que el convencional. La contradicción aparece al cruzar esos datos con el destino real del material: la ciudad genera 18.861 toneladas de LFU al año, de las cuales el 71,9% termina en valorización energética, quemada como combustible, el 17,2% va a reencauche y apenas una porción marginal se convierte en GCR para pavimentos (IDU, citado en Martínez-Arguelles et al., 2018). La norma está vigente, la tecnología funciona, las plantas existen. Lo que no opera es el eslabón que debería llevar la llanta desde el punto de descarte hasta esas plantas.

La base técnica del GCR en pavimentos es sólida, viene construyéndose desde hace más de dos décadas y los resultados son consistentes (Martínez-Arguelles et al., 2018). El material, como modificador asfáltico, cumple. Lo que no funciona es la cadena previa: la que debería mover la llanta usada desde quien la descarta hasta la trituradora. Los puntos de acopio habilitados son insuficientes y su distribución territorial ignora dónde se genera el flujo; la articulación entre actores de la cadena es deficiente; y los gestores que operan sin autorización ambiental, que mueven una porción real del volumen, trabajan al margen de cualquier esquema de registro (MADS, 2017). La Resolución 6981 de 2011 de la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) establece que el GCR destinado al uso de mezclas asfálticas debe cumplir con

especificaciones de granulometría y encontrarse libre de metales, textiles y otros contaminantes (SDA, 2011). Un material que circula por circuitos informales difícilmente llega a esas condiciones. El cuello de botella no es tecnológico: es de gobernanza del flujo de residuo.

Las fuentes académicas sobre el tema llevan décadas documentando el desempeño del GCR como modificador asfáltico. Lo que escasea son estudios sobre el tramo anterior: quién recoge la llanta, en qué condiciones, con qué incentivos económicos y qué tan formalizado está ese proceso. Ese vacío documental es especialmente marcado para el contexto bogotano en el período 2020-2025 (Goevert, 2024; MADS, 2022). Esa brecha tiene implicaciones prácticas: sin información organizada sobre los nudos críticos de la recolección, cualquier política orientada a escalar el programa GCR en la ciudad operará sobre supuestos antes que sobre evidencia. Esta investigación busca contribuir a reducir ese déficit.

Bogotá produce 18.861 toneladas de LFU al año (IDU, citado en Martínez-Arguelles et al., 2018), lleva más de una década con una exigencia contractual de GCR en sus obras viales (SDA, 2011) y cuenta con capacidad instalada para procesar ese material; aun así, la mayor parte de esas llantas termina quemada o en acumulación no gestionada. El eslabón que falla está en la recolección: en cómo se organiza territorialmente, qué actores participan, bajo qué lógica económica operan y qué tan formal es ese proceso. De ahí surge la pregunta que orienta este estudio: ¿Cuáles son los principales retos y oportunidades en la recolección de LFU en Bogotá para su aprovechamiento en mezclas asfálticas? El propósito es analizar los factores que condicionan esa recolección y su potencial de integración como material de aprovechamiento vial, a partir de una Revisión Documental Sistemática (RDS) de fuentes académicas, normativas e institucionales del período 2020-2025.

El documento avanza en el siguiente orden: los objetivos y la justificación acotan el propósito y la pertinencia del estudio; el marco teórico despliega los ejes conceptuales que lo

sustentan, comenzando por las mezclas asfálticas con GCR y la gestión de LFU, y avanzando hacia la logística inversa, la economía circular, la informalidad en cadenas de suministro de residuos y la trazabilidad en sistemas posconsumo; la metodología detalla el diseño de la RDS, los parámetros de selección documental y las fases del proceso investigativo; el diagnóstico examina el estado actual del sistema de recolección en Bogotá junto con los referentes nacionales e internacionales; el análisis de resultados identifica los factores críticos que condicionan el desempeño del sistema y contrasta dichos hallazgos con la evidencia comparada y, a partir de ello, construir una propuesta de mejora. Las conclusiones recogen los hallazgos principales del estudio y lo que estos significan para la política distrital.

Objetivos

Objetivo general

Analizar los retos y oportunidades en la recolección de LFU en Bogotá y su potencial de integración en mezclas asfálticas como material de aprovechamiento vial.

Objetivos específicos

- Elaborar el marco teórico que sustente la recolección de LFU y su aprovechamiento en mezclas asfálticas con GCR en Bogotá.
- Diagnosticar el estado actual del sistema de recolección y acopio de LFU en Bogotá, considerando experiencias nacionales e internacionales vinculadas a proyectos de infraestructura vial.
- Formular una propuesta de mejora para el sistema de recolección de LFU en Bogotá que favorezca su aprovechamiento en mezclas asfálticas con GCR.

Justificación

Bogotá reúne condiciones que la convierten en el escenario más relevante del país para estudiar este problema. Es la ciudad con mayor generación de LFU, con 18.861 toneladas al año, y al mismo tiempo la única que tiene una exigencia contractual vigente de GCR en su malla vial desde 2012, con una meta institucional del 25% que no se ha alcanzado (IDU, citado en Martínez-Arguelles et al., 2018; SDA, 2011). Esa combinación, alta generación de residuo y demanda institucional activa sin un sistema de recolección que los conecte, convierte a Bogotá en el lugar donde la brecha es más visible y donde las implicaciones de no resolverla son más directas. La mayor parte de ese material no alcanza ningún proceso de valorización útil: termina quemado o en acumulación no gestionada, a pesar de que el IDU sostiene una demanda activa y verificable de GCR para la malla vial. La flota vehicular de la ciudad no da señales de estabilizarse, y con ella el volumen del flujo de residuo, mientras la capacidad del esquema de acopio permanece estancada. Determinar qué factores explican esa brecha es el aporte central de este trabajo.

Desde 2012, Bogotá tiene una política que obliga al uso de GCR en obras de malla vial, con una meta del 25% como horizonte (SDA, 2011). Esa demanda institucional no ha sido suficiente para consolidar un esquema de acopio que opere de manera coordinada y con trazabilidad verificable. Los actores del sistema, tanto los habilitados como los que trabajan al margen de la regulación, responden a incentivos que no están alineados entre sí, lo que fragmenta la cadena de suministro del residuo y deteriora la calidad del material disponible para procesamiento (MADS, 2022; Goevert, 2024). Esa dinámica requiere ser comprendida antes de diseñar intervenciones de política pública con posibilidades reales de modificar el resultado.

Los hallazgos de este estudio tienen destinatarios concretos. El IDU, la SDA y la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP) requieren información organizada sobre

los cuellos de botella del sistema para tomar decisiones sobre su escala y estructura. Rueda Verde, Sistema Verde y los demás gestores habilitados que intervienen en la cadena tienen el mismo requerimiento: información organizada sobre dónde falla el flujo para poder ajustar su operación. Sin evidencia documental sobre qué falla y dónde, las decisiones sobre el programa GCR en la ciudad seguirán siendo reactivas antes que estratégicas.

Las fuentes académicas colombianas sobre LFU se han concentrado casi sin excepción en el desempeño técnico del GCR, un campo bien documentado. Lo que permanece sin trabajar de manera sistemática es el tramo anterior: los factores logísticos, los incentivos económicos y la estructura de actores que condicionan si el material llega al procesador en condiciones adecuadas (Goevert, 2024; MADS, 2022). Este estudio aporta evidencia documental sobre ese tramo para el período 2020-2025 en Bogotá, construyendo un marco analítico que puede replicarse en otras ciudades colombianas con desafíos similares en flujos de residuo con régimen diferenciado.

El trabajo responde a los criterios de investigación aplicada de la Universidad EAN, dentro del eje temático que articula gestión ambiental con desarrollo sostenible, y se apoya en los lineamientos que el MADS (2022) ha definido para avanzar hacia un modelo de producción y consumo circular en el país.

Marco teórico

La comprensión del problema de recolección de LFU en Bogotá requiere un soporte conceptual que articule las dimensiones técnicas, logísticas y organizacionales del sistema. Los ejes que siguen se desarrollan de lo particular a lo estructural: primero el residuo en sí y su potencial de aprovechamiento, luego los marcos teóricos que explican por qué los sistemas encargados de movilizarlo funcionan o fallan. Esa secuencia refleja la lógica del problema: el material y su destino técnico están documentados; la cadena que conecta ambos extremos sigue sin resolverse.

Gestión de LFU

Las LFU constituyen un flujo de residuo con características particulares que complican su gestión: son voluminosas, no se degradan en plazos humanos razonables y su composición varía según el tipo de vehículo y el tiempo de uso, lo que afecta la calidad del GCR obtenido (Goevert, 2024). En Colombia, la Resolución 1326 de 2017 del MADS estableció el marco de responsabilidad extendida del productor para este flujo, trasladando a productores e importadores la obligación de financiar y operar sistemas de recolección selectiva con metas anuales de acopio verificables (MADS, 2017). Los programas posconsumo autorizados bajo ese marco, entre ellos Rueda Verde y Sistema Verde, operan como articuladores entre los puntos de generación y las plantas de procesamiento, gestionando la recolección, el transporte y la entrega del material. Su cobertura es heterogénea en el territorio y su capacidad de absorción resulta insuficiente frente al volumen que genera el país, cercano a las 61.000 toneladas anuales (MADS, 2022). A escala distrital, el IDU y la SDA son los actores que más directamente conectan ese flujo con el aprovechamiento vial, mientras que la UAESP complementa el esquema desde la gestión integral de residuos en el Distrito.

Mezclas asfálticas con granulado de caucho reciclado

El GCR es el producto obtenido por trituración mecánica de LFU, una vez separados el acero y las fibras textiles que componen su estructura. Incorporado en mezclas asfálticas, actúa como modificador del ligante bituminoso y mejora el comportamiento del pavimento frente a la fatiga, la deformación permanente y el agrietamiento térmico (Goevert, 2024). La evidencia técnica acumulada durante más de dos décadas es consistente en ese sentido, con estudios que documentan mayor vida útil del pavimento modificado respecto al convencional (Martínez-Arguelles et al., 2018). En Colombia, la normativa que regula su uso en infraestructura vial establece requisitos técnicos específicos: la Resolución SDA 6981 de 2011 exige granulometría inferior a 595 μm , ausencia de metales y textiles, y trazabilidad del proceso para el GCR destinado a mezclas asfálticas en el Distrito Capital (SDA, 2011), mientras que el Artículo 413-13 de las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) fija un contenido mínimo del 10% para obras de la red vial nacional (INVIAS, 2013). Ese marco técnico se actualizó mediante la Resolución 4561 de 2022, que adoptó los Artículos 413-22 y 467-22 como norma vigente para nuevos contratos de la red vial nacional; los contratos adjudicados antes de noviembre de 2022 mantienen las especificaciones de la versión anterior (INVIAS, 2022).

Esos requisitos determinan directamente qué material es elegible y en qué condiciones de recolección y procesamiento puede serlo.

Logística inversa aplicada a LFU

Cuando una llanta deja de rodar, empieza otro recorrido que la gestión ambiental lleva décadas intentando formalizar. La logística inversa es el campo que organiza ese trayecto de vuelta: cómo los materiales que ya cumplieron su función encuentran un segundo lugar en la cadena productiva, con valor técnico y económico remanente (Rogers & Tibben-Lembke, 1999, citado en Govindan & Bouzon, 2018). Para flujos convencionales, el esquema ya es complejo.

Para las LFU, lo es más: están dispersas por toda la geografía urbana, tienen peso y volumen considerables, y su condición física varía según el tipo de vehículo y el tiempo de uso. Moverlas desde el punto de descarte hasta el procesador va más allá de un problema de transporte: requiere articular actores que operan con lógicas e incentivos distintos, y formalizar eslabones que hoy funcionan en los márgenes de la regulación (Govindan & Bouzon, 2018).

Economía circular aplicada a LFU

El modelo de economía circular parte de una premisa de consecuencias amplias: los materiales deberían tener siempre un siguiente uso antes que un destino final (Ellen MacArthur Foundation, 2024). Aplicada al problema de las llantas, esa premisa se traduce en una cadena técnica concreta que implica triturar el material, acondicionar el granulado y reintegrarlo al asfalto como modificador, produciendo un pavimento con mejor comportamiento ante la fatiga y mayor durabilidad que el convencional (Goevert, 2024). Lo que esta lógica suele omitir es que el ciclo no se cierra solo. Entre la llanta descartada y el granulado que llega a la planta asfaltadora hay una cadena de acopio que debe garantizar volumen suficiente, flujo regular y calidad mínima para que el procesamiento sea viable (MADS, 2022). Cuando esa cadena falla, el principio circular se queda como enunciado antes que como práctica operativa.

Informalidad en cadenas de suministro de residuos

En América Latina, la gestión de flujos de residuos raramente funciona como un sistema ordenado de actores habilitados y rutas controladas. Lo que existe, en la práctica, es una superposición: operadores con autorización ambiental que responden a esquemas regulados, y una red paralela de gestores que mueven el mismo material sin registro, sin habilitación y con una estructura de costos que les otorga ventaja territorial sobre los formales (Rincón-Maldonado & Hultman, 2024). Para las LFU, esa coexistencia tiene una consecuencia técnica directa: el caucho que transita por canales informales rara vez llega al procesador con la granulometría y

el nivel de pureza que la norma exige para incorporarlo a mezclas asfálticas (SDA, 2011). La informalidad va más allá de un déficit de habilitación administrativa: genera un problema de calidad de insumo que afecta directamente la viabilidad del aprovechamiento del material.

Trazabilidad y sistemas de información en la gestión posconsumo

Un esquema de acopio sin trazabilidad opera, en el mejor de los casos, sobre estimaciones. No hay forma de confirmar qué volúmenes efectivamente se recogieron, porque rutas circularon ni en qué condiciones llegaron al procesador (Goevert, 2024). Los programas posconsumo que han logrado escalar en otros contextos comparten un rasgo estructural: han invertido en hacer visible lo que ocurre en cada eslabón. Signus en España y Reciclanip en Brasil son los referentes más citados; ambos operan con plataformas que registran en tiempo real los movimientos del material, desde el punto de acopio hasta la planta (SIGNUS Ecovalor, 2023; Reciclanip, 2023). El contraste con Colombia es marcado: Brasil reporta tasas de cumplimiento cercanas al 98% sobre las metas establecidas; Colombia ronda el 45%, y los análisis que han examinado esa brecha señalan como factor explicativo central la ausencia de datos públicos confiables sobre el destino real del material recuperado (Padilla et al., 2025).

Análisis bibliométrico

La revisión bibliométrica realizada en Scopus para el período 2003-2023 permitió identificar el estado de la producción académica sobre el aprovechamiento de neumáticos fuera de uso en mezclas asfálticas. Los resultados apuntan a una oportunidad antes que a un déficit del campo: la escasez de estudios enfocados en la cadena de recolección para el contexto latinoamericano, y particularmente para Bogotá, confirma que existe un vacío documental que esta investigación busca atender.

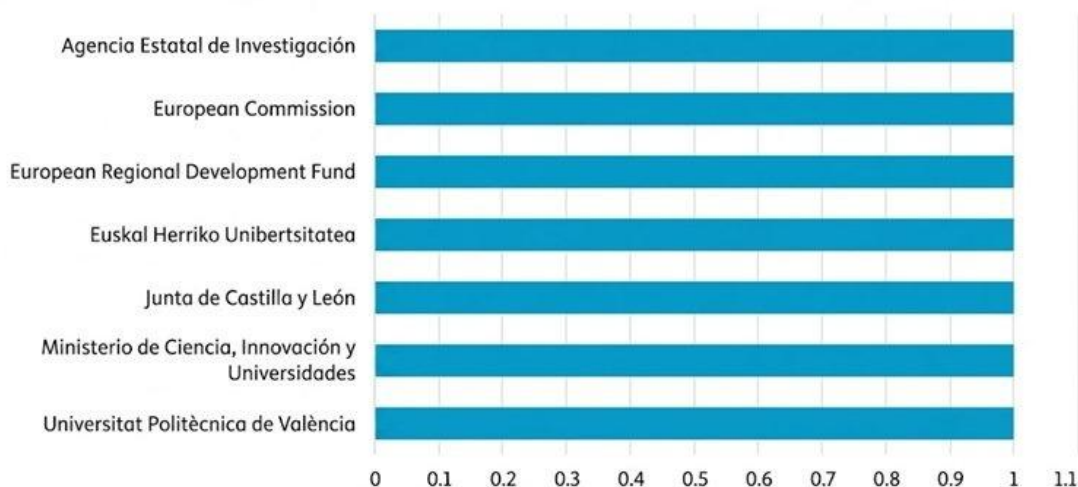
El financiamiento de la investigación en este campo proviene casi en su totalidad de instituciones europeas, con predominio español: la Agencia Estatal de Investigación, la

Comisión Europea, el Fondo Europeo de Desarrollo Regional y la Universitat Politècnica de Valencia encabezan la lista (ver figura 1). Ese patrón tiene una explicación directa: el desarrollo del campo ha ocurrido en contextos donde los sistemas de gestión posconsumo ya están consolidados. Para el proyecto LFU, este dato muestra que la literatura existente parte de condiciones operativas muy distintas a las de Bogotá, donde la cobertura territorial es incompleta y la informalidad es estructural.

Figura 1

Documentos clasificados según el patrocinador de financiamiento
Documents by funding sponsor

Compare the document counts for up to 15 funding sponsors.



Nota. Elaboración propia

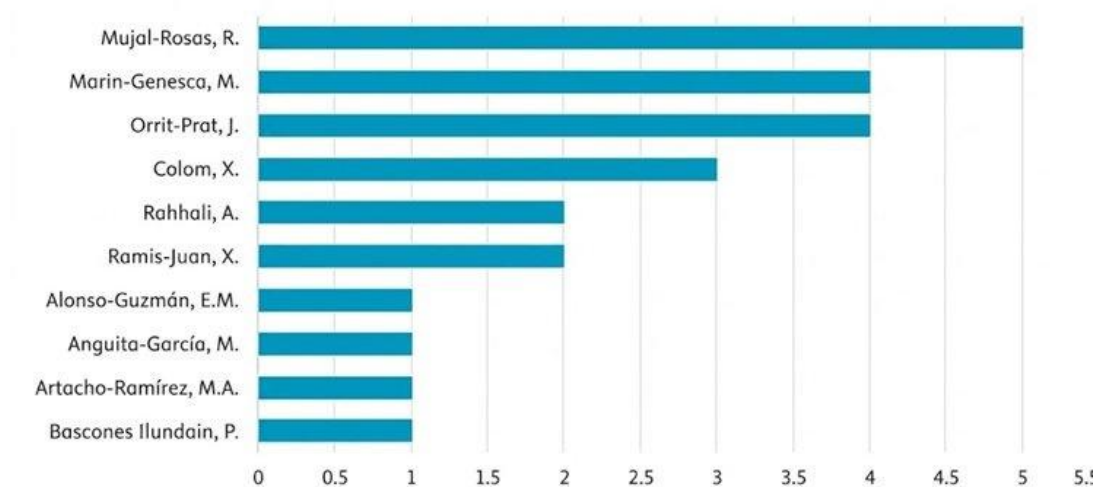
Mujal-Rosas, Marín-Genesca y Orrit-Prat concentran el mayor número de publicaciones en el campo, lo que sugiere la existencia de grupos de investigación con trayectoria sostenida en el tema (ver figura 2). Para esta investigación, ese dato tiene una implicación directa: la producción académica sobre aprovechamiento de neumáticos en mezclas asfálticas está anclada en núcleos específicos antes que distribuida de forma dispersa, lo que facilita el rastreo de las líneas de trabajo consolidadas y permite identificar con mayor precisión los vacíos que el caso bogotano representa dentro de ese mapa de conocimiento.

Figura 2

Documentos por autor

Documents by author

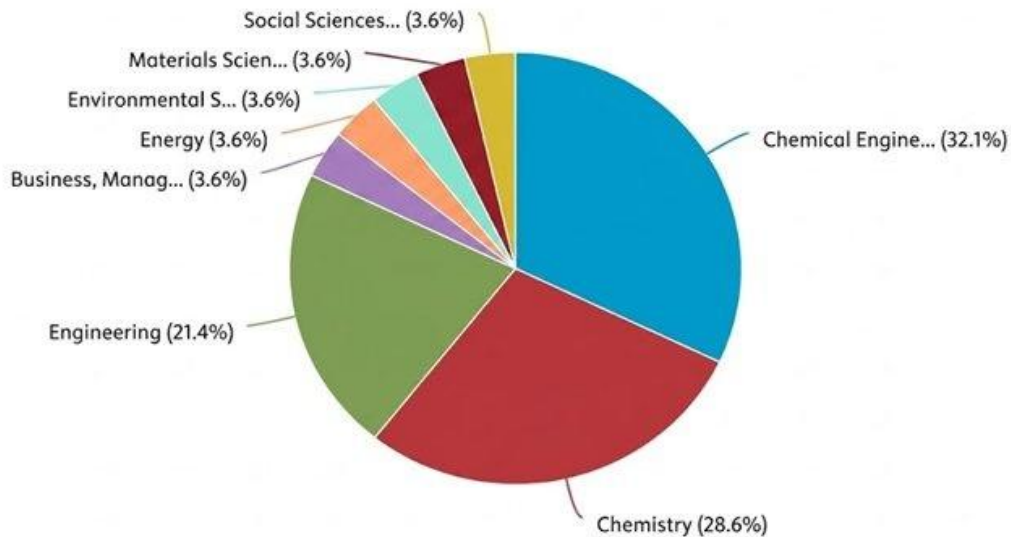
Compare the document counts for up to 15 authors.



Nota. Elaboración propia

La investigación sobre aprovechamiento de neumáticos en mezclas asfálticas se concentra en ingeniería química (32,1%) y química (28,6%), con una participación menor de ingeniería general (21,4%) (ver figura 3). Las ciencias ambientales, las ciencias sociales y la gestión representan cada una apenas el 3,6% del total. Esa distribución tiene una lectura directa para este proyecto: el campo ha priorizado el desempeño técnico del material por encima de las dimensiones organizacionales y logísticas que condicionan si ese material llega al procesador en condiciones adecuadas. En ese espacio, escasamente atendido por la literatura, se ubica esta investigación.

Figura 3
Distribución de los documentos según el área temática
Documents by subject area



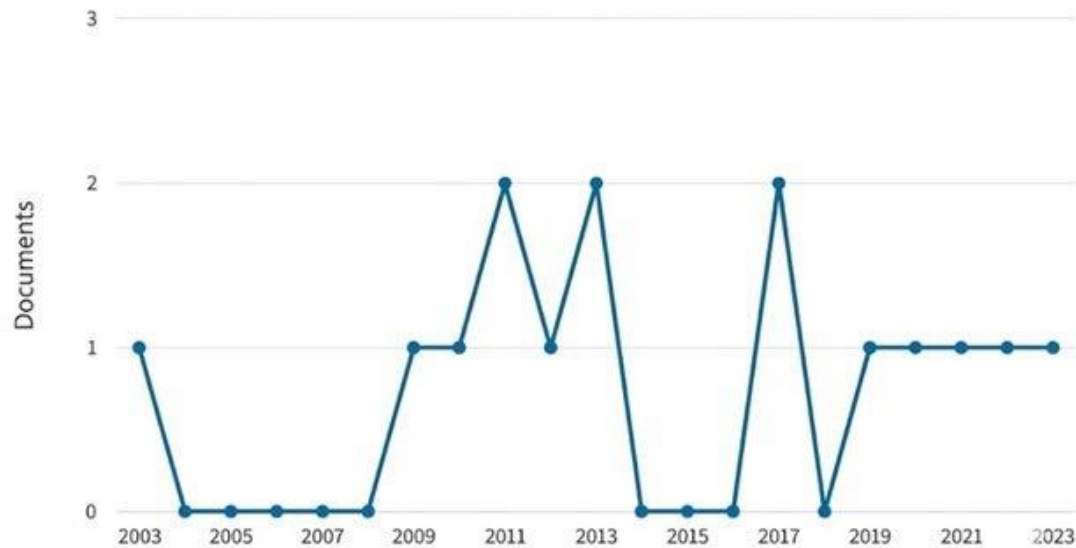
Nota. Elaboración propia

El comportamiento anual de publicaciones entre 2003 y 2023 muestra un crecimiento sostenido desde 2009, lo que confirma que el interés académico en el aprovechamiento de neumáticos en mezclas asfálticas refleja una tendencia consolidada (ver figura 4). Para esta investigación, ese dato tiene una lectura adicional: ese crecimiento global no se ha traducido en estudios sobre la cadena de recolección en contextos como el bogotano, donde las condiciones logísticas, institucionales y de informalidad son estructuralmente distintas a las de los países que lideran el campo. Un campo en expansión con un vacío documental específico es, precisamente, el escenario que justifica esta investigación.

Figura 4

Tendencia de publicaciones por año (2003–2025).

Documents by year



Nota. Elaboración propia

La evidencia bibliométrica apunta en una dirección clara: el campo del aprovechamiento de neumáticos en mezclas asfálticas tiene una base técnica sólida y en crecimiento, construida casi en su totalidad desde contextos europeos con sistemas posconsumo consolidados. La dimensión logística y organizacional de la recolección, el problema central que enfrenta Bogotá, aparece de forma marginal en esa producción. Esa brecha justifica la investigación antes que debilitarla. El vacío documental identificado confirma que existe un problema real sin atender sistemáticamente, y que los hallazgos de este estudio tienen potencial de contribución concreta al campo.

Metodología

Enfoque y alcance de la investigación

Esta investigación adopta un enfoque cualitativo. De acuerdo con Hernández-Sampieri y Mendoza (2023), la investigación cualitativa es apropiada cuando el propósito es comprender fenómenos complejos desde múltiples perspectivas, explorar las razones por las cuales un sistema funciona o falla e interpretar procesos sociales, institucionales y organizacionales que no pueden ser reducidos a variables numéricas. Ese es precisamente el caso del sistema de recolección de LFU en Bogotá: no se trata de medir una magnitud; se enfoca en identificar y explicar los factores operativos, económicos, institucionales y de gobernanza que condicionan el desempeño de una cadena logística que, pese a contar con un marco normativo formal y tecnología verificada, no produce los resultados esperados.

El enfoque responde también a la naturaleza de las fuentes disponibles: la información sobre el sistema en el período 2020–2025 no está sistematizada en bases de datos estadísticas uniformes; se halla, por el contrario, dispersa en documentos normativos, informes institucionales, reportes de gestión de los programas posconsumo y literatura académica especializada. Organizar e interpretar esas fuentes heterogéneas es, en sí mismo, un ejercicio cualitativo (Creswell & Creswell, 2023; Flick, 2023).

En cuanto al alcance, el estudio es descriptivo-analítico. La dimensión descriptiva caracteriza el estado actual del sistema de recolección en Bogotá: sus actores, estructura operativa, cobertura territorial y flujos de material. La dimensión analítica identifica los factores que condicionan ese estado y los contrasta con experiencias nacionales e internacionales comparables. Según Hernández-Sampieri y Mendoza (2023), los estudios descriptivos se enfocan en detallar las características importantes de un fenómeno, mientras que los estudios

analíticos añaden una explicación: investigan qué está pasando, qué lo causa y en qué circunstancias.

El diseño es una Revisión Documental Sistemática (RDS), estrategia reconocida como método riguroso para la síntesis e interpretación de evidencia existente (Page et al., 2021). Su pertinencia se sostiene en tres razones: el problema no requiere producción de datos primarios, pues la evidencia sobre el sistema existe aunque dispersa; los objetivos de diagnosticar, caracterizar y proponer son alcanzables con suficiencia metodológica mediante revisión documental con criterios explícitos y replicables; y la dimensión comparada del estudio, que incluye experiencias en España, Brasil, Estados Unidos y Chile, se atiende mejor con el análisis de documentos institucionales y publicaciones especializadas que con trabajo de campo en múltiples países.

La RDS sigue los lineamientos del enfoque PRISMA en su versión de 2021 (Page et al., 2021), adaptados al carácter cualitativo del estudio. El período privilegiado es 2020–2025, por ser el posterior a la consolidación del sistema de responsabilidad extendida del productor (REP) bajo la Resolución 1326 de 2017 y el de mayor déficit de documentación académica para el caso bogotano. Se incluyen fuentes anteriores a 2020 cuando su relevancia normativa o técnica lo justifica.

Población y muestra

En los estudios que adoptan un diseño documental, la población se define como el conjunto total de fuentes escritas que contienen información pertinente para comprender el fenómeno objeto de investigación. Para esta investigación, la población comprende el conjunto de fuentes escritas, académicas, normativas e institucionales que abordan la gestión, recolección y aprovechamiento de LFU en Colombia y Bogotá, las mezclas asfálticas modificadas con GCR, el marco regulatorio aplicable y las experiencias internacionales

comparables en el período 2020–2025. Esta definición es coherente con lo señalado por Arias-Gómez et al. (2016), quienes precisan que en estudios documentales la población es el conjunto de unidades de análisis, en este caso documentos, que comparten las características del objeto de estudio.

La muestra está conformada por las fuentes documentales seleccionadas según los parámetros de selección detallados en la Tabla 1. La selección no se basa en un procedimiento aleatorio, sino en criterios de pertinencia y saturación teórica, incorporando documentos hasta que la información recopilada deja de aportar nuevos elementos sobre las variables analizadas (Flick, 2023; Hernández-Sampieri & Mendoza, 2023).

Tabla 1

Criterios de inclusión y exclusión de las fuentes documentales

Criterio	Inclusión	Exclusión
Tipo de fuente	Artículos científicos indexados (Scopus, Web of Science, SciELO, Redalyc); normas colombianas y distritales vigentes; informes institucionales y técnicos; normativa internacional; memorias de sostenibilidad de sistemas posconsumo.	Artículos de laboratorio sin relación con recolección, gobernanza o política pública; normas derogadas sin valor histórico relevante; prensa no institucional como fuente primaria de evidencia.
Período	2003–2025 con prioridad en 2020–2025; fuentes anteriores a 2020 solo cuando su relevancia normativa o técnica lo justifica.	No aplica restricción temporal específica de exclusión.
Temática	Gestión de LFU, logística inversa, economía circular, GCR en mezclas asfálticas, REP en contexto latinoamericano	Desempeño técnico de laboratorio del GCR sin vínculo con la cadena de recolección ni la política pública
Ámbito geográfico	Colombia, Bogotá y referentes internacionales con similitud relevante: España, Brasil, Estados Unidos, Chile y México	Estudios circunscritos a regiones sin similitud con el contexto colombiano o latinoamericano.
Idioma	Español e inglés	Cualquier idioma distinto al español o el inglés
Entidades emisoras	MADS, ANLA, IDU, SDA, INVIAS, ANDI, Rueda Verde, SIGNUS, Reciclanip, USTMA; directivas europeas, EPA, CONAMA	Fuentes de prensa no institucional como sustento de datos estadísticos o afirmaciones técnicas

Nota. Elaboración propia

Variables de análisis

Las variables de análisis delimitan los aspectos del fenómeno que serán observados, interpretados y comparados a lo largo de la investigación. A diferencia de las variables cuantitativas, que se operacionalizan en escalas de medición, las variables en un diseño documental cualitativo se definen conceptualmente y se operacionalizan mediante categorías e indicadores cualitativos que permiten organizar, clasificar y contrastar la información extraída de las fuentes documentales (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2023). Esta investigación trabaja con cuatro variables, definidas de manera deductiva con base en el marco teórico y los objetivos específicos, pero abiertas a elementos emergentes durante el proceso de revisión.

Estado del sistema de recolección de LFU en Bogotá (2020–2025)

La primera variable reúne los datos descriptivos que caracterizan el funcionamiento actual del sistema. Se despliega en cuatro dimensiones: actores del sistema (entidades públicas, programas posconsumo habilitados, operadores informales y generadores); cobertura territorial (distribución geográfica de los puntos de acopio en relación con los patrones de generación); volúmenes de recolección gestionados y su correspondencia con la generación estimada para el distrito; y rutas del material desde el punto de descarte hasta el procesador, con sus destinos finales verificados.

Factores condicionantes del sistema de recolección

La segunda variable interpreta por qué el sistema opera como opera. Sus cuatro dimensiones son: factores operativos y logísticos (infraestructura de acopio, capacidad de transporte, condiciones de almacenamiento); factores económicos (estructura de costos, márgenes de rentabilidad, competencia formal-informal, incentivos); factores institucionales y de gobernanza (coordinación interinstitucional, aplicación de la norma, trazabilidad, información pública disponible); y factores de calidad del material (cumplimiento de los estándares técnicos

que el asfalto exige). Estas dimensiones no son independientes: se condicionan mutuamente, y parte del análisis consiste en comprender cómo interactúan.

Marco normativo e institucional

La tercera variable sistematiza los instrumentos regulatorios del sistema. Se organiza en cuatro dimensiones: regulación nacional (Resolución 1326 de 2017 del MADS y normas complementarias de REP); regulación distrital (Resolución 6981 de 2011 de la SDA y especificaciones IDU ET-2011); normativa técnica (Artículos 413-22 y 467-22 de las Especificaciones INVIAS de 2022); y referentes internacionales (directivas europeas, Resolución CONAMA 416/2009 de Brasil y Ley REP 20.920 de Chile).

Potencial de aprovechamiento de LFU en mezclas asfálticas con GCR

La cuarta variable recoge la evidencia técnica y la experiencia comparada que fundamentan la viabilidad del aprovechamiento. Su propósito es establecer que la limitación del sistema no es técnica, más bien es de carácter logístico e institucional. Comprende tres dimensiones: desempeño técnico verificado del GCR en mezclas asfálticas (laboratorio y campo, en Bogotá y en contextos comparados); demanda institucional activa y condiciones de mercado; y barreras técnicas y económicas para la implementación a mayor escala. La tabla 2 sintetiza la estructura de las variables y su relación con los objetivos específicos de la investigación:

Tabla 2

Variables de análisis y su relación con los objetivos específicos de la investigación

Variable de análisis	Dimensiones principales	Objetivo específico relacionado
1. Estado del sistema de recolección (2020–2025)	Actores, cobertura, volúmenes, rutas	OE2: Diagnosticar el estado actual
2. Factores condicionantes	Operativos, económicos, institucionales, calidad	OE2: Diagnosticar el estado actual
3. Marco normativo e institucional	Nacional, distrital, técnico, internacional	OE1: Elaborar el marco teórico
4. Potencial de aprovechamiento en mezclas asfálticas	Desempeño técnico, demanda, barreras	OE3: Formular propuesta de mejora

Nota. Elaboración propia

Instrumentos

Los instrumentos permiten registrar, sistematizar y recuperar de manera estructurada el contenido de las fuentes revisadas (Krippendorff, 2019). La investigación emplea dos:

Protocolo de búsqueda y selección documental

Registra para cada documento identificado: identificador único, tipo de fuente, título completo, autores o entidad emisora, año de publicación, base de datos o repositorio de procedencia, criterio de inclusión aplicado y observación sobre su pertinencia para las variables de análisis. Garantiza la trazabilidad del proceso y permite replicar la búsqueda en etapas posteriores.

Matriz de análisis documental

Es el instrumento central, ya que para cada documento de las fuentes documentales registra: referencia completa en APA 7.^a edición, variable y dimensión a la que aporta, hallazgos principales, limitaciones o sesgos de la fuente y citas seleccionadas para el análisis. Su estructura de doble entrada, documentos en filas y variables en columnas, facilita la

identificación de convergencias, divergencias y vacíos entre fuentes (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2023).

Técnicas para el análisis de la información

El análisis de la información recopilada en la matriz documental se realiza mediante tres técnicas complementarias:

Análisis de contenido cualitativo

Es la técnica central y consiste en procedimientos replicables para realizar inferencias válidas a partir del texto (Krippendorff, 2019). Opera en tres momentos: preanálisis (lectura exploratoria y organización en la matriz), codificación (asignación de códigos a cada fragmento relevante según la variable o dimensión pertinente) e interpretación (identificación de tendencias, tensiones y vacíos que respondan a la pregunta de investigación).

Análisis comparado de experiencias

Contrasta el sistema bogotano con experiencias en España, Brasil, Estados Unidos y Chile para identificar factores de éxito, barreras superadas y condiciones de transferibilidad. No busca establecer equivalencias directas entre sistemas distintos, sino más bien identificar similitudes y diferencias que iluminen las particularidades del caso estudiado (Kosmützky, 2020). La comparación opera sobre las variables 3 y 4, conectando los resultados con los factores condicionantes de la variable 2.

Triangulación de fuentes

Contrasta información proveniente de fuentes académicas, normativas e institucionales sobre el mismo fenómeno para verificar la consistencia de los hallazgos y reducir el sesgo inherente a cada tipo de fuente (Creswell & Creswell, 2023; Flick, 2023). Cuando los tres tipos de fuentes coinciden en señalar un mismo factor, la evidencia se considera robusta. Cuando

presentan discrepancias, la divergencia se interpreta como indicador de tensión o ambigüedad en el sistema, lo que requiere mayor profundidad analítica.

Supuestos de investigación

La naturaleza cualitativa y documental de esta investigación lleva a formular supuestos orientadores en lugar de hipótesis de verificación estadística. En los estudios cualitativos, los supuestos funcionan como guías analíticas que orientan la lectura de las fuentes documentales sin constituir enunciados rígidos de causa-efecto (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2023; Creswell & Creswell, 2023).

El supuesto central que orienta esta investigación es el siguiente:

La brecha entre las metas de recolección de LFU establecidas en el marco normativo vigente y los niveles de aprovechamiento efectivamente alcanzados en Bogotá no se explica por limitaciones técnicas del proceso de incorporación de GCR en mezclas asfálticas; se debe, principalmente, a factores de gobernanza, coordinación institucional insuficiente e informalidad estructural en la cadena de recolección, que impiden garantizar el volumen, la regularidad y la calidad del material requerido para escalar el programa de aprovechamiento vial.

Este supuesto orienta el análisis hacia los factores de la Variable 2 como los de mayor capacidad explicativa, sin descartar elementos emergentes durante la revisión. No se verificará de manera estadística: se contrastará cualitativamente con los hallazgos que arroje el análisis de contenido y la triangulación de fuentes.

Diagnóstico

Este apartado responde al segundo objetivo específico: diagnosticar el estado actual del sistema de recolección y acopio de LFU en Bogotá durante el período 2020–2025, considerando experiencias nacionales e internacionales vinculadas a proyectos de infraestructura vial. El análisis se basa en las cuatro variables de la metodología y termina con

el uso de una herramienta de machine learning para el análisis de las fuentes documentales, así como con la identificación de los nudos críticos del sistema.

Estado del sistema de recolección de LFU en Bogotá (2020–2025)

El sistema involucra actores en dos niveles: en el nivel público, la SDA actúa como ente rector, registra gestores, supervisa la Resolución 6981 de 2011 y coordina las jornadas de recolección. La SDM, la UAESP, la UMV, el IDU y TransMilenio participan como aliados operativos (SDA, 2024). En el nivel privado formal, Rueda Verde agrupa a más de 75 empresas, cubre el 91% del mercado de llantas y reporta 32 millones de unidades gestionadas desde 2013 (ANDI, 2025). Ese sistema formal coexiste con operadores informales que mueven una proporción real del flujo sin registro ni habilitación, lo que reduce la base de financiamiento del sistema colectivo sin reducir el volumen descartado (Park et al., 2018).

Colombia genera 61.000 toneladas de LFU anuales (MADS, 2022); Bogotá aporta 18.861, equivalentes a 4,7 millones de llantas por año (IDU, citado en Martínez-Arguelles et al., 2018). En 2024, los gestores registrados ante la SDA recolectaron únicamente 43.328 llantas en el Distrito, menos del 1% del total generado (SDA, 2024). El cumplimiento efectivo sobre las metas de la Resolución 1326 de 2017 ronda el 45% a escala nacional, frente al 98% que Brasil reporta (Padilla et al., 2025). La Figura 5 muestra la magnitud de esa brecha.

Figura 5

Brecha entre generación y recolección formal de LFU en Bogotá



Nota. Elaboración propia con base en Martínez-Arguelles et al., (2018) y SDA (2024).

El destino del material invierte la jerarquía de la Resolución 1326 de 2017: el 71,9% termina en valorización energética, el 17,2% en reencauche y apenas una porción marginal en GCR para pavimentos (Martínez-Arguelles et al., 2018). La Figura 6 muestra esa distribución; lo anterior invierte el orden de prelación que el CONPES 3874 (Departamento Nacional de Planeación, 2016) y la Resolución 1326 de 2017 establecen: el aprovechamiento material, que debería ser prioritario, ocupa el lugar marginal.

Figura 6

Destino del material LFU en Bogotá



Nota. Elaboración propia con base en Martínez-Arguelles et al., (2018).

Factores condicionantes del sistema de recolección

El análisis de las cuatro dimensiones de esta variable (operativa y logística, económica, institucional y de gobernanza, y calidad del material) permite identificar los factores que explican el comportamiento del sistema descrito en la variable anterior. Los hallazgos principales de cada dimensión se recopilan en la siguiente tabla.

Tabla 3

Factores condicionantes del sistema de recolección de LFU en Bogotá

Dimensión	Hallazgo principal	Consecuencia en el sistema
Operativa y logística	Los 92 puntos de acopio no corresponden geográficamente con las zonas de mayor generación (Puente Aranda, Kennedy, Fontibón, Bosa, Suba). La SDA identificó 107 focos de acumulación ilegal en las rondas de los ríos Tunjuelo, Fucha y Bogotá (SDA, 2024).	Zonas de alta generación sin cobertura formal; los operadores informales ocupan ese espacio con menores costos y mayor flexibilidad horaria (Govindan & Bouzon, 2018).
Económica	Entre el 50% y el 60% del GCR procesado no encuentra comprador efectivo (El Tiempo, 2016). Los gestores no habilitados no asumen costos de habilitación ni calidad, lo que les permite ofrecer precios más bajos al generador (Park et al., 2018).	Desincentivo para ampliar capacidad instalada; el generador final no recibe beneficio por entregar la llanta en el canal formal (Govindan & Bouzon, 2018).
Institucional y de gobernanza	Seis entidades con mandatos distintos (SDA, SDM, UAESP, UMV, IDU, TransMilenio) sin mecanismo formal de sincronización. La ANLA supervisa metas, pero la aplicación de sanciones a importadores no inscritos ha sido débil (Park et al., 2018).	Imposibilidad de verificar volúmenes, rutas y condiciones del material en tiempo real (Goevert, 2024).
Calidad del material	La Resolución 6981 de 2011 exige GCR que pase 100% por tamiz de 0,60 mm y llegue libre de metales y fibras textiles (SDA & SDM, 2011). El material del circuito informal raramente cumple esas condiciones (Peláez Arroyave et al., 2017).	Incertidumbre en los gestores viales; preferencia por asfalto convencional pese a la obligatoriedad normativa.

Nota. Elaboración propia.

Marco normativo e institucional

La Resolución 1326 de 2017 establece metas de recolección hasta 2028 y define la jerarquía de gestión con el reencauche como primera opción (MADS, 2017). La Resolución 6981 de 2011 obliga a incluir GCR en un mínimo del 5% de los metros cuadrados de cada contrato vial distrital, con incrementos anuales hasta el 25% (SDA y SDM, 2011). Park et al. (2018) concluyeron que Colombia adoptó el modelo de REP sin los ajustes que el entorno nacional requería, produciendo un sistema formalmente exigente pero operativamente limitado. Esa brecha persiste en el período 2020–2025. El análisis comparado confirma que el factor diferenciador entre sistemas de alto y bajo desempeño no es la norma; por el contrario, radica

en la trazabilidad y la existencia de un mercado institucional estable para el GCR. La Tabla 4 y la Figura 7 presentan ese comparativo.

Tabla 4

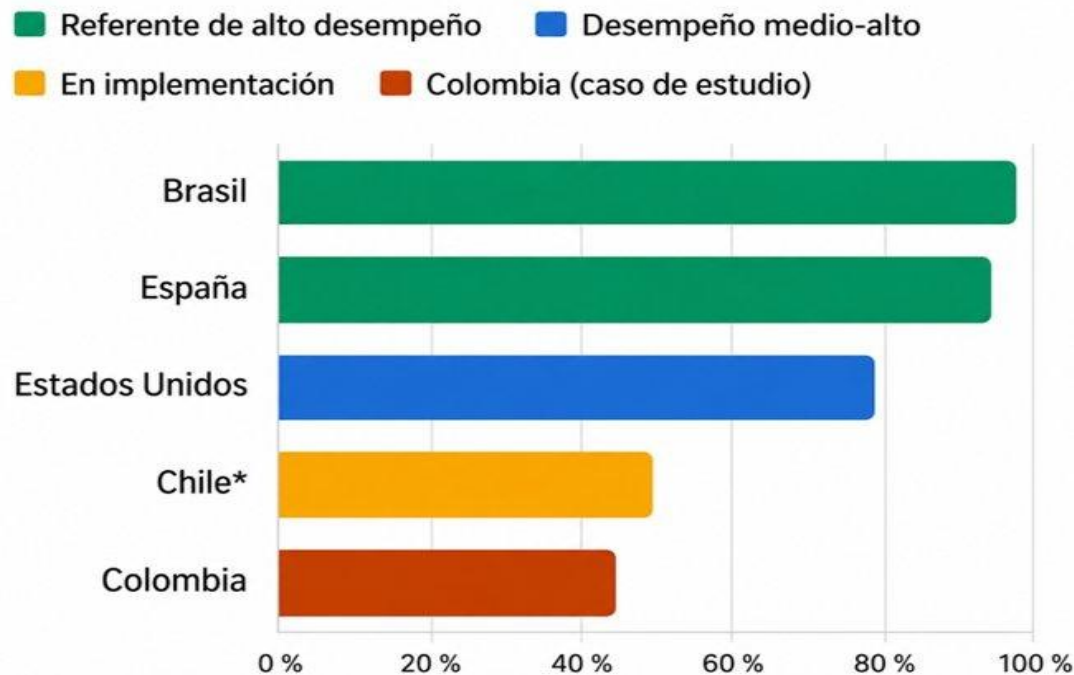
Referentes internacionales en gestión de LFU y aprovechamiento asfáltico

País	Norma principal	Operador REP	Cumplimiento	Factor diferenciador	Aprovechamiento vial
Brasil	Res. CONAMA 416/2009	Reciclanip	98%	Trazabilidad en tiempo real (IBAMA)	+27.000 km (Greca Asfaltos)
España	Directiva 1999/31/CE; Ley REP	SIGNUS Ecovalor	95%	Plataforma digital de seguimiento por gestor y municipio.	350 km en 2024; reducción 2–5 dB de ruido.
EE. UU.	Legislación estatal (48 estados)	USTMA / ADOT	79%	45 años de experiencia en Arizona; demanda estatal sostenida.	Vida útil del pavimento: 10–12 años.
Chile	Ley 20.920/2016; En DS 8/2019	En construcción	Meta 50%*	Implementación desde 2023; diseño incorpora lecciones de Brasil y Europa.	En desarrollo; demanda institucional en diseño.
Colombia	Res. 1326/2017 MADS; Res. 6981/2011 SDA	Rueda Verde / Sistema Verde	~45%	Marco normativo completo; brecha en trazabilidad e incentivos.	+90 tramos IDU; meta 25% GCR sin alcanzar.

Nota. *Meta del primer año de implementación (2023). Elaboración propia con base en Padilla et al. (2025), Reciclanip (2023), SIGNUS Ecovalor (2025), Federal Highway Administration (2020) y Ministerio del Medio Ambiente de Chile (2016).

Figura 7

Comparativo internacional de cumplimiento de metas de recolección de LFU



Nota. *Chile operativizó su sistema REP en enero de 2023; el porcentaje corresponde a meta del primer año (50 %). Elaboración propia con base en Padilla et al. (2025), Reciclanip (2023), SIGNUS Ecovalor (2025), Federal Highway Administration (2020) y Ministerio del Medio Ambiente de Chile (2016).

Potencial de aprovechamiento de LFU en mezclas asfálticas con GCR

Desde 2001, el IDU construyó más de 90 tramos viales con mezclas modificadas con GCR, verificando comportamiento superior en fatiga y ahuellamiento (Martínez-Arguelles et al., 2018). Cada metro cúbico de mezcla requiere 3,5 llantas, lo que convierte la malla vial en expansión del IDU en una demanda cuantificable de material. La limitación del sistema no es técnica (el GCR funciona); radica en la logística: sin suministro regular y de calidad verificada, la demanda institucional del 25% establecida por la Resolución 6981 de 2011 no puede materializarse. La Tabla 5 sintetiza las barreras que impiden la implementación a mayor escala.

Tabla 5

Barreras para la implementación masiva del GCR en mezclas asfálticas

Barrera	Descripción	Estado en Bogotá
Sobrecosto inicial	Entre el 20% y el 30% por encima del asfalto convencional.	Los análisis de costo de ciclo de vida son favorables a largo plazo, pero las entidades contratantes priorizan el menor precio de construcción inicial.
Equipamiento especializado	La vía húmeda requiere mezcladores de alto cizallamiento no disponibles en todas las plantas.	Capacidad instalada existente, pero subutilizada por insuficiencia de suministro.
Variabilidad de calidad del GCR	La coexistencia del circuito formal con el informal produce material heterogéneo que no siempre cumple las especificaciones (Peláez Arroyave et al., 2017).	Genera incertidumbre en los gestores viales y refuerza la preferencia por el asfalto convencional.

Nota. Elaboración propia

Herramienta de machine learning aplicada al diagnóstico: análisis de las fuentes documentales de investigación mediante TF-IDF y K-means

La clasificación manual de las 50 fuentes documentales en las cuatro variables de análisis depende del juicio del investigador. Para validarla de manera cuantitativa, se aplicó un modelo no supervisado que combina TF-IDF y K-means directamente sobre las fuentes. TF-IDF convierte cada documento en un vector numérico donde los términos discriminantes reciben mayor peso; K-means agrupa esos vectores en cuatro clusters que corresponden a las cuatro variables (Müller & Guido, 2017; James et al., 2023).

La implementación se realizó en Python con scikit-learn: vectorización, reducción de dimensionalidad con TruncatedSVD, agrupamiento y visualización (Galea & Capelo, 2018; Rebala et al., 2019). El parámetro `random_state = 42` garantiza reproducibilidad; el script completo no supera 60 líneas de código (Theodoridis, 2015).

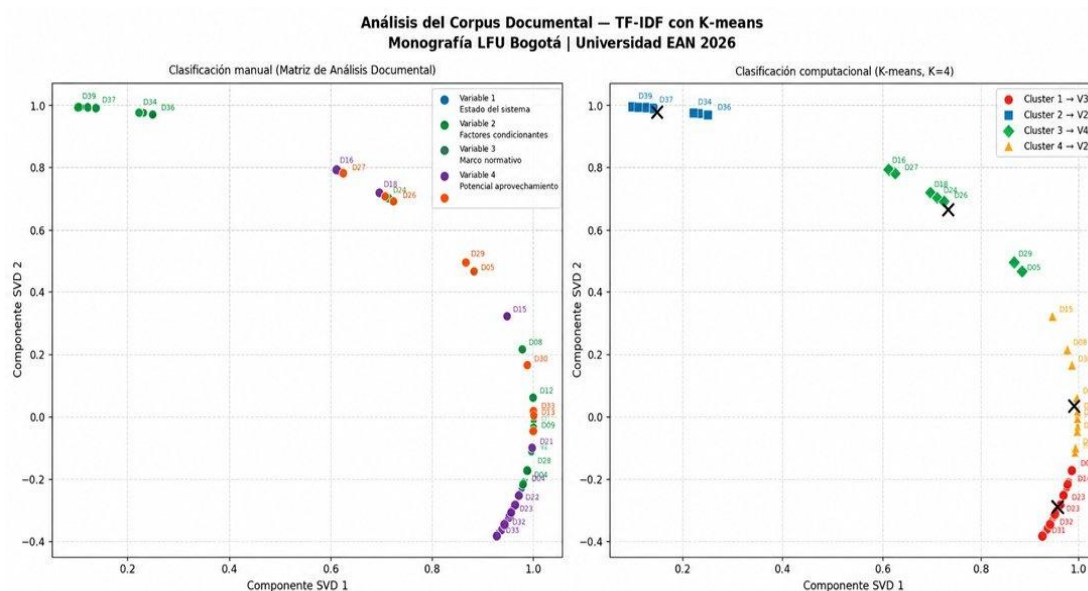
El modelo asignó correctamente 32 de los 50 documentos al mismo grupo que la clasificación manual, lo que representa una concordancia del 64 %. Ese resultado valida la

coherencia interna del análisis cualitativo: en un conjunto documental donde todos los documentos comparten vocabulario temático sobre llantas, recolección y GCR, que el modelo identifique agrupaciones temáticas propias en casi dos tercios de los casos confirma que las cuatro variables tienen identidad diferenciable.

Los 18 documentos en los que la clasificación computacional difiere de la manual no debilitan el diagnóstico; revelan conexiones entre variables que el análisis cualitativo no había explicitado, lo que enriquece la interpretación. Por ejemplo, las fuentes sobre trazabilidad internacional fueron agrupadas por el modelo con la Variable 2 (factores condicionantes) en lugar de la Variable 4, lo que tiene sentido analítico: esos documentos explican el desempeño del sistema tanto como documentan el aprovechamiento vial. Las zonas de menor densidad en el mapa (ver figura 8) confirman el vacío documental sobre la cadena logística de recolección en América Latina, hallazgo que el análisis bibliométrico ya había identificado.

Figura 8

Análisis de las fuentes documentales – TF-IDF con K-means.



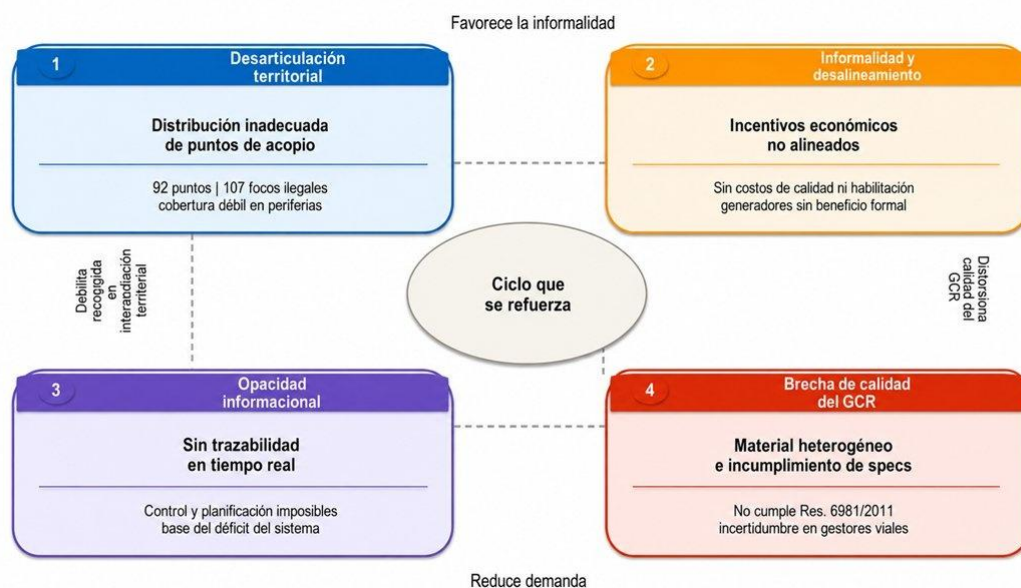
Nota. Elaboración propia a partir del modelo aplicado.

Nudos críticos del sistema

El análisis de las cuatro variables revela que los factores que limitan el sistema no operan de manera aislada. La figura 9 muestra cómo cada nudo alimenta al siguiente: la desarticulación territorial favorece la informalidad, esta deteriora la calidad del GCR, la mala calidad deprime la demanda y la demanda deprimida restringe la inversión en trazabilidad y cobertura.

Figura 9

Ciclo de interdependencia de los nudos críticos del sistema de recolección de LFU en Bogotá



Nota. Elaboración propia.

La desarticulación territorial deja zonas de alta generación sin cobertura formal; el desalineamiento de incentivos hace que ningún actor de la cadena tenga motivación para operar de otro modo. La opacidad informativa impide el control y la planificación con datos reales. Y la brecha de calidad del GCR genera incertidumbre en los gestores viales sobre la consistencia del material.

Estos nudos se refuerzan en ciclo: la desarticulación favorece la informalidad, esta deteriora la calidad, la mala calidad deprime la demanda y la demanda deprimida comprime los márgenes del sector formal, limitando la inversión en trazabilidad. El supuesto central de la investigación queda respaldado: la brecha no se debe a problemas técnicos del GCR; por el contrario, radica en factores de gobernanza e informalidad en la cadena de recolección.

Análisis de resultados

Retos y oportunidades del sistema

La Tabla 6 cruza los cinco retos identificados con las oportunidades del mismo sistema para resolverlos. Cada par confirma que las intervenciones requeridas no parten de cero: la plataforma normativa, técnica e institucional ya existe.

Tabla 6

Retos y oportunidades del sistema de recolección de LFU en Bogotá

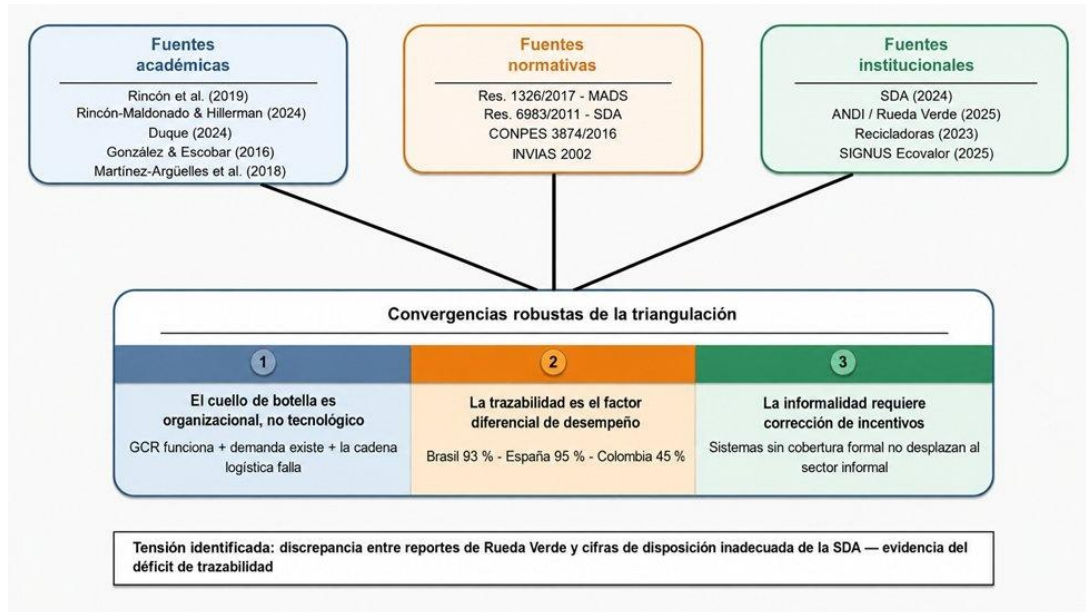
N.º	Reto	Oportunidad correspondiente
1	Fragmentación territorial: la cobertura formal no corresponde a donde se genera el residuo; la informalidad ocupa ese vacío (SDA, 2024; Rincón-Maldonado & Hultman, 2024).	Marco normativo completo que habilita la redistribución de la red de acopio sin nueva legislación (MADS, 2017; SDA y SDM, 2011).
2	Desalineamiento de incentivos: ningún actor de la cadena (generador, operador informal ni gestor formal) tiene motivación económica para operar de otro modo (Park et al., 2018; Govindan & Bouzon, 2018).	Viabilidad técnica del GCR verificada en más de 90 tramos viales del IDU; el material no requiere demostración adicional (Martínez-Arguelles et al., 2018).
3	Opacidad informacional: sin trazabilidad no hay control efectivo ni planificación basada en datos reales (Goevert, 2024).	Referentes internacionales con soluciones probadas: Brasil (98%) y España (95%) resolvieron este reto con trazabilidad sistemática (Padilla et al., 2025; Industriambiente, 2025).
4	Brecha de calidad del GCR: el circuito informal produce material heterogéneo que no cumple las especificaciones técnicas y genera incertidumbre en los gestores viales (Peláez Arroyave et al., 2017).	Capacidad instalada de procesamiento subutilizada; cualquier mejora en la recolección se traduce en aprovechamiento sin nueva inversión en infraestructura.
5	Desconexión entre la obligación de recolectar y la demanda vial institucional: dos mandatos paralelos sin mecanismo que los conecte funcionalmente (Park et al., 2018).	Demanda vial garantizada por norma (25% de GCR por m ² de obra) del IDU como mercado de base estable y predecible (SDA y SDM, 2011; WBCSD, 2019).

Nota. Elaboración propia.

Triangulación de fuentes

Figura 10

Convergencias entre fuentes académicas, normativas e institucionales



Nota. Elaboración propia.

La base documental muestra tres convergencias sólidas; la primera, el cuello de botella es organizacional: fuentes académicas, normativas e institucionales coinciden en que el GCR funciona y la demanda existe, pero la cadena logística falla (Martínez-Argüelles et al., 2018; MADS, 2017; SDA, 2024). La segunda, la trazabilidad es el factor diferencial entre sistemas de alto y bajo desempeño, identificado por la literatura comparada y los informes de los sistemas exitosos (Padilla et al., 2025; Reciclanip, 2023; Park et al., 2018). Y la tercera, la informalidad cede ante incentivos, no ante sanciones; distintas tradiciones disciplinares llegan a ese mismo punto (Rincón-Maldonado & Hultman, 2024; Park et al., 2018; Govindan & Bouzon, 2018).

La tensión más relevante de las documentales surge entre los volúmenes que Rueda Verde reporta haber gestionado (ANDI, 2025) y la disposición inadecuada documentada por la

SDA (2024). La discrepancia refleja metodologías distintas y ausencia de trazabilidad unificada; no implica reportes incorrectos. Esa inconsistencia es evidencia directa del tercer reto.

Contraste del supuesto central

El siguiente contraste cruza el supuesto orientador de la investigación con la evidencia documental que lo respalda y lo matiza.

Tabla 7

Contraste entre el supuesto central de investigación y la evidencia documental

Supuesto	Evidencia que lo confirma	Matización relevante
La brecha entre metas y resultados no se explica por limitaciones técnicas del GCR, sino por factores de gobernanza, coordinación insuficiente e informalidad estructural en la cadena de recolección.	La viabilidad técnica está verificada (Martínez-Arguelles et al., 2018; FHWA, 2020). Los factores de gobernanza quedan documentados por fuentes académicas, institucionales y comparadas (Park et al., 2018; Goevert, 2024; SDA, 2024)	La trazabilidad no es un componente más del sistema: representa su condición de posibilidad. Sin registro verificado del flujo del material, ningún otro instrumento de política opera con rendición de cuentas real.

Nota. Elaboración propia

Ejes de intervención y marco de sostenibilidad

Los retos y oportunidades identificados apuntan a tres ejes de intervención que la propuesta de mejora desarrolla, todos apoyados en el estándar P5 del GPM Global (2025), cuyo resultado es pasar del 5% actual al 25% de GCR en la malla vial, meta fijada desde 2012 que no se ha alcanzado por razones organizacionales, no técnicas.

Tabla 8

Ejes de intervención y su interdependencia en el sistema de recolección de LFU en Bogotá

Eje	¿Qué resuelve?	¿Por qué no funciona solo?
Gobernanza del flujo	La ausencia de un mecanismo formal que sincronice al IDU, la SDA, la UAESP y los programas posconsumo, que hoy operan con calendarios, metas y sistemas de reporte distintos, sin un protocolo que los obligue a coordinarse.	Sin gobernanza, la trazabilidad carece de estructura institucional que la sostenga.
Trazabilidad del material	La invisibilidad del material en tránsito: hoy no existe registro de qué volúmenes se mueven, por qué rutas circulan ni en qué condiciones llegan al procesador.	Sin trazabilidad, los incentivos operan sobre estimaciones antes que sobre evidencia.
Incentivos alineados	La asimetría económica que permite a los gestores informales ofrecer precios más competitivos al evitar costos de habilitación, transporte regulado y reporte a las autoridades.	Sin incentivos, los operadores formales seguirán compitiendo en desventaja estructural frente al circuito informal.

Nota. Elaboración propia

Respuesta a la pregunta de investigación

Los retos del sistema son de gobernanza, no de tecnología ni de norma. Las oportunidades son de activación de lo existente, no de construcción desde cero. La intervención requerida es precisa: coordinación, trazabilidad y corrección de incentivos sobre la plataforma normativa e institucional que Bogotá ya tiene.

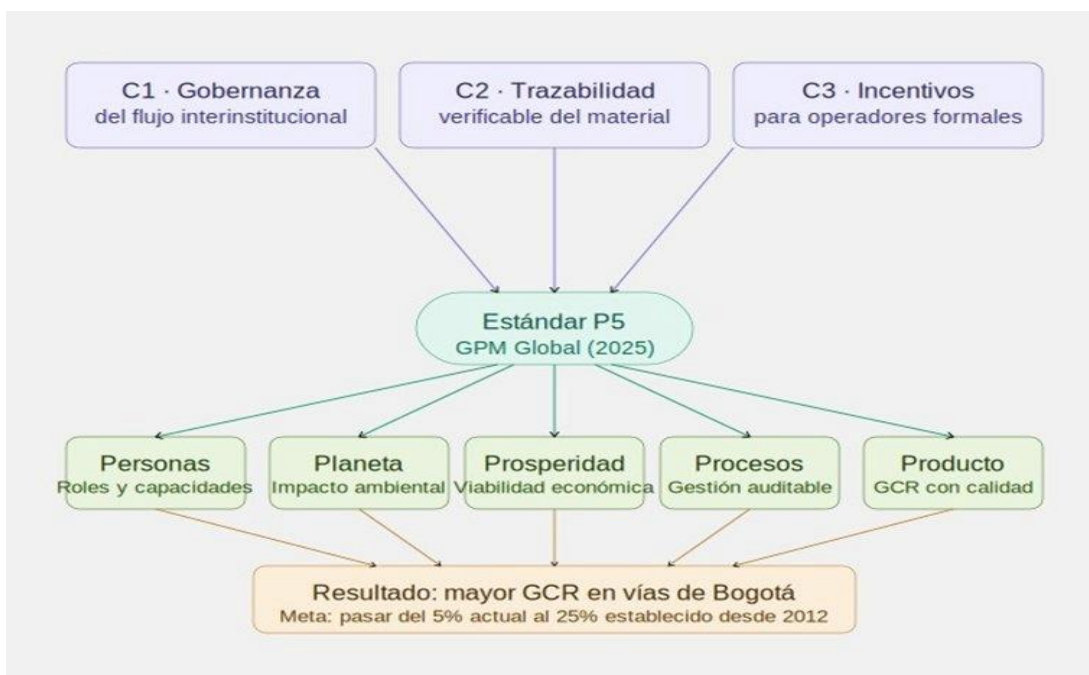
Propuesta

Mejora para el sistema de recolección de LFU en Bogotá

El diagnóstico muestra que las limitaciones del sistema tienen origen organizacional antes que técnico. La propuesta se organiza en tres componentes interdependientes: gobernanza del flujo, trazabilidad del material e incentivos para operadores formales, todos apoyados en el P5 del GPM Global (2025). Cada componente incluye acciones concretas, indicadores de avance y su relación con las cinco dimensiones del estándar: Personas, Planeta, Prosperidad, Procesos y Producto.

Figura 11

Integración de los componentes de la propuesta con el estándar P5 del GPM Global



Nota. Elaboración propia con base en GPM Global (2025).

Gobernanza del flujo y coordinación interinstitucional

El primer componente interviene el nudo central que el diagnóstico identificó: la ausencia de un mecanismo formal que sincronice a los actores institucionales que participan en la

cadena de recolección de LFU en Bogotá. El IDU, la SDA, la UAESP y los programas posconsumo autorizados (Rueda Verde y Sistema Verde) operan con calendarios, metas y sistemas de reporte distintos, sin un protocolo que los obligue a coordinarse. Se proponen las siguientes acciones:

- Establecer un protocolo conjunto IDU-SDA que defina metas anuales de acopio verificables por localidad, con revisión semestral de cumplimiento.
- Articular los puntos de recolección existentes con la planificación de obras viales del IDU, de forma que la demanda de GCR se proyecte con base en el volumen real disponible por zona.
- Crear un mecanismo de reporte compartido entre Rueda Verde, Sistema Verde y el IDU que cruce la demanda de GCR de las obras programadas con el material disponible para procesamiento.
- Publicar anualmente un informe de avance del programa GCR por localidad, con datos abiertos sobre volúmenes acopiados, gestores habilitados activos y porcentaje de cumplimiento de metas.

Indicadores asociados

- **Cobertura territorial del acopio (%):** Mide qué proporción de las localidades de Bogotá cuenta con al menos un punto de recolección habilitado, activo y articulado con el IDU.

$$\% \text{ cobertura} = \left(\frac{\text{Localidades con punto activo articulado}}{\text{total localidades}} \right) \times 100 \quad (1)$$

- **Cumplimiento de metas de acopio por localidad (%):** Compara el volumen de LFU efectivamente acopiado en cada localidad contra la meta anual definida en el protocolo IDU-SDA.

$$\% \text{ cumplimiento} = \left(\frac{\text{volumen de acopio por localidad}}{\text{Meta anual por localidad}} \right) \times 100 \quad (2)$$

- **Tasa de articulación institucional (%):** Mide qué porcentaje de las obras viales del IDU con uso de GCR contó con proyección de demanda basada en datos reales del sistema de acopio.

$$\% \text{ articulación} = \left(\frac{\text{Obras con proyección basada en datos reales}}{\text{Total obras con GCR}} \right) \times 100 \quad (3)$$

Integración con P5

Tabla 9

Integración del Componente 1 con el estándar P5 del GPM Global

N.º	Dimensión	Impacto en el componente
1	Personas	Definición de roles y responsabilidades en IDU, SDA y UAESP. Rendición de cuentas mediante informes anuales públicos.
2	Planeta	Coordinación territorial reduce material en disposición inadecuada. Cada tonelada en el sistema formal deja de circular sin control ambiental.
3	Prosperidad	Metas verificables por localidad generan certeza para planificar operación e inversión en capacidad instalada.
4	Procesos	Protocolo estandarizado convierte práctica discrecional en proceso replicable y auditable entre entidades.
5	Producto	Flujo territorial organizado incrementa GCR disponible que cumple especificaciones de la Resolución SDA 6981 de 2011.

Nota. Elaboración propia

Trazabilidad verificable del flujo de material

El segundo componente aborda la invisibilidad del material en tránsito. Hoy no existe un sistema que registre qué volúmenes de LFU se mueven, por qué rutas circulan ni en qué condiciones llegan al procesador. Sin esa información, cualquier decisión sobre el programa GCR opera sobre estimaciones antes que sobre evidencia. Se proponen las siguientes acciones:

- Implementar un sistema de registro unificado de implementación progresiva que conecte los puntos de acopio con los gestores habilitados y con el IDU, con registro por punto del volumen recibido, el gestor que retira el material y el destino de procesamiento.
- Adoptar un código de trazabilidad por lote que acompañe el material desde el punto de acopio hasta la planta procesadora, verificable en cada transferencia de custodia.
- Integrar el sistema de registro con la plataforma de seguimiento del programa posconsumo de la SDA, de forma que los datos sean consultables en tiempo real por las entidades competentes.
- Publicar trimestralmente los indicadores de flujo del sistema, desagregados por localidad y gestor, como mecanismo de verificación institucional.

Indicadores asociados

- **Cobertura del registro por punto de acopio (%):** Mide qué proporción de los puntos habilitados está activamente reportando datos al sistema de registro unificado.

$$\% \text{ cobertura registro} = \left(\frac{\text{Puntos con reporte activo}}{\text{Total puntos habilitados}} \right) \times 100 \quad (4)$$

- **Tasa de trazabilidad del material (%):** Compara el volumen de LFU con código de trazabilidad verificado en destino final contra el total acopiado en el período.

$$\% \text{ trazabilidad} = \left(\frac{\text{Volumen con trazabilidad verificada}}{\text{Volumen total acopiado}} \right) \times 100 \quad (5)$$

- **Tiempo promedio de ciclo acopio-procesamiento (días):** Mide el tiempo entre el registro de ingreso del material en el punto de acopio y su confirmación de recepción en la planta procesadora.

$$\text{Tiempo ciclo} = (\text{Fecha recepción planta} - \text{Fecha registro acopio}) \quad (6)$$

Integración con P5

Tabla 10

Integración del Componente 2 con el estándar P5 del GPM Global

N.º	Dimensión	Impacto en el componente
1	Personas	Capacitación de operadores en la plataforma y en transferencia de custodia. Nuevo perfil de responsabilidad técnica en gestores habilitados.
2	Planeta	Identifica volúmenes que circulan por canales informales sin control ambiental. Orienta la regulación hacia los puntos de mayor riesgo.
3	Prosperidad	Gestores con trazabilidad demuestran desempeño ante IDU y SDA, mejorando su posición frente a operadores sin registro.
4	Procesos	Convierte una práctica fragmentada en proceso auditable con datos por localidad, gestor y período.
5	Producto	Permite acreditar ante SDA y ANLA que el material en obras viales proviene de un sistema formal con control de calidad.

Nota. Elaboración propia

- **Personas:** El sistema de registro exige capacitación de los operadores de puntos de acopio en el uso de la plataforma y en los procedimientos de transferencia de custodia, generando un nuevo perfil de responsabilidad técnica en los gestores habilitados.
- **Planeta:** La trazabilidad permite identificar con precisión qué volúmenes de LFU circulan por canales informales sin control ambiental, generando la evidencia necesaria para orientar acciones de regulación hacia los puntos de mayor riesgo.
- **Prosperidad:** Los gestores habilitados que operan con trazabilidad pueden demostrar su desempeño ante el IDU y la SDA, accediendo a condiciones contractuales diferenciadas que mejoran su posición competitiva frente a operadores sin registro.

- **Procesos:** El registro unificado convierte una práctica hoy fragmentada en un proceso auditable, con datos desagregados por localidad, gestor y período, que permite tomar decisiones con base en evidencia.
- **Producto:** GCR con trazabilidad verificada desde el origen permite al IDU acreditar ante la SDA y la ANLA que el material incorporado en obras viales proviene de un sistema formal con control de calidad.

Incentivos alineados para operadores formales

El tercer componente atiende la raíz económica del problema. Los gestores informales operan con costos estructuralmente más bajos que los habilitados porque evitan los gastos de habilitación ambiental, transporte regulado y reporte a las autoridades. Esa ventaja les permite ofrecer precios más competitivos a los generadores de residuo, desviando una porción real del flujo hacia circuitos sin registro ni control de calidad (Rincón-Maldonado & Hultman, 2024).

Mientras esa asimetría económica persista, la gobernanza y la trazabilidad operarán sobre un sistema que pierde material antes de que entre al registro. Se proponen las siguientes acciones:

- Incorporar en los pliegos de contratación del IDU un criterio de preferencia para el GCR proveniente de gestores con trazabilidad verificada, generando demanda diferenciada para el material formal.
- Vincular los puntos de recolección habilitados a campañas de comunicación dirigidas a talleres, concesionarios y transportadores, informando sobre los beneficios de la entrega formal y los riesgos de los canales sin autorización ambiental.
- Establecer un reconocimiento público anual a los gestores habilitados con mejor desempeño en volumen acopiado y trazabilidad verificada, como mecanismo de diferenciación en el mercado.

- Proponer ante la SDA y el IDU la creación de una tarifa diferenciada de disposición para generadores que entreguen LFU exclusivamente a gestores con habilitación ambiental vigente.

Indicadores asociados

- **Participación del sector formal en el flujo total (%):** Mide qué proporción del volumen total de LFU acopiado en Bogotá pasa por gestores con habilitación ambiental vigente.

$$\% \text{ formalidad} = \left(\frac{\text{Volumen acopiado por gestores habilitados}}{\text{Volumen total estimado LFU generado}} \right) \times 100 \quad (7)$$

- **Tasa de conversión de generadores a entrega formal (%):** Compara el número de talleres, concesionarios y transportadores que entregan LFU a puntos habilitados contra el universo de generadores registrados ante la SDA.

$$\% \text{ conversión} = \left(\frac{\text{Generadores con entrega formal verificada}}{\text{Total generadores registrados}} \right) \times 100 \quad (8)$$

- **Diferencial de precio formal-informal (%):** Monitorea la brecha entre el precio que ofrecen los gestores habilitados y el que ofrecen los operadores sin registro por tonelada de LFU recogida.

$$\% \text{ diferencia} = \left(\frac{(\text{Precio informal} - \text{Precio formal})}{\text{Precio informal}} \right) \times 100 \quad (9)$$

Integración con P5

Tabla 11

Integración del Componente 3 con el estándar P5 del GPM Global

N.º	Dimensión	Impacto en el componente
1	Personas	Campañas a talleres, concesionarios y transportadores generan decisión informada. Reconocimiento público fortalece la identidad profesional del sector formal
2	Planeta	Reduce disposición inadecuada: acumulación en zonas urbanas, quema a cielo abierto, contaminación de suelos y fuentes hídricas.
3	Prosperidad	Preferencia IDU por GCR con trazabilidad crea mercado institucional estable, reduciendo incertidumbre económica que desincentiva inversión en capacidad instalada.
4	Procesos	Convierte decisión discrecional en procedimiento reglado y auditable, con resultados anuales por gestor que generan ciclo de mejora continua.
5	Producto	Mayor volumen de GCR de gestores habilitados fortalece confiabilidad del insumo y acerca el sistema a la meta de la Resolución SDA 6981 de 2011.

Nota. Elaboración propia

Los tres componentes operan como sistema, no como medidas aisladas. La gobernanza del flujo establece quién hace qué y con qué metas; la trazabilidad hace visible cuánto material se mueve y hacia dónde; y los incentivos alineados inclinan la balanza económica hacia la formalidad. Ninguno funciona bien sin los otros dos: sin gobernanza, la trazabilidad no tiene estructura institucional que la sostenga; sin trazabilidad, los incentivos operan sobre estimaciones antes que sobre evidencia; sin incentivos, los operadores formales seguirán compitiendo en desventaja frente al circuito informal.

Lo que hace viable esta propuesta no es novedad normativa ni tecnológica. El marco regulatorio ya existe, los actores institucionales ya están identificados y los programas posconsumo ya operan. Lo que se propone es una reorganización de las condiciones bajo las cuales esos elementos interactúan: que el IDU y la SDA coordinen con metas verificables, que

el material tenga trazabilidad desde el origen y que la formalidad deje de ser la opción económicamente desventajosa.

Conclusiones

El estudio permitió establecer que el uso del GCR en mezclas asfálticas cuenta con respaldo técnico y normativo suficiente; sin embargo, su aprovechamiento en la ciudad de Bogotá continúa limitado por problemas de coordinación, trazabilidad y control del flujo de LFU antes de su llegada al procesador. En ese sentido, la principal dificultad no se ubica en la capacidad del material para incorporarse a la infraestructura vial; se ubica, en cambio, en la organización de la cadena que debe garantizar su recolección, clasificación, calidad y suministro continuo.

El análisis del sistema durante el periodo 2020-2025 evidencia que la ciudad enfrenta una brecha persistente entre el volumen de llantas que genera y el material que efectivamente ingresa al canal formal de aprovechamiento. Esta situación se relaciona con una red de acopio que no responde plenamente a la distribución territorial del residuo y con incentivos económicos que favorecen circuitos informales. A esto se suma la falta de información confiable sobre el origen, la cantidad y las condiciones del material recolectado. Como resultado, el sistema de recolección pierde eficacia para convertir una obligación ambiental en una práctica sostenida de economía circular.

La propuesta formulada interviene esa brecha bajo el estándar P5 del GPM Global mediante tres componentes articulados: un protocolo conjunto IDU-SDA-UAESP con metas de acopio por localidad, que permitiría ordenar responsabilidades y reducir la dispersión de información que actualmente dificulta el seguimiento del residuo; un sistema unificado de registro y trazabilidad por lote, que contribuiría a verificar el recorrido del material y a fortalecer la confianza en su calidad antes de su incorporación en mezclas asfálticas; y la reconfiguración de los pliegos del IDU para corregir las asimetrías que benefician al circuito informal. En

conjunto, estos componentes orientan la gestión del residuo hacia criterios de trazabilidad verificable en la contratación pública y hacia una articulación institucional con base territorial.

Estos componentes operan sobre el marco normativo vigente y no requieren la expedición de una nueva legislación. La Resolución SDA 6981 de 2011 y la Resolución MADS 1326 de 2017 ofrecen una base suficiente para orientar la gestión del residuo y su aprovechamiento. No obstante, su efectividad depende de que las entidades responsables actúen de manera coordinada, cuenten con información verificable y adopten mecanismos de seguimiento que permitan controlar el flujo del material desde su generación hasta su incorporación en obras viales.

El aporte central de este estudio al campo académico consiste en documentar, para el período 2020-2025, los factores que condicionan la cadena logística de recolección de llantas fuera de uso en Bogotá desde un enfoque de gobernanza del flujo. La literatura disponible ha dado mayor atención al desempeño técnico del GCR en mezclas asfálticas, mientras que la etapa logística previa al procesamiento, pese a ser determinante para la viabilidad del programa de aprovechamiento vial, ha sido objeto de menor atención sistemática. Por ello, el marco analítico construido puede servir como referencia para otras ciudades colombianas que gestionan residuos de manejo especial y tienen demanda institucional verificable para su aprovechamiento.

Referencias

- Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2020). *Decreto 345 de 2020, por el cual se adopta la actualización del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos del Distrito Capital*.
<https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=99595>
- Asociación Nacional de Empresarios de Colombia. (2025). Rueda Verde cumple trece años promoviendo el reciclaje de llantas. <https://www.andi.com.co/Home/Noticia/17865-rueda-verde-cumple-trece-anos-promovien>
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2023). Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches (6th ed.). SAGE Publications. <https://us.sagepub.com/en-us/nam/research-design/book255675>
- Dabic-Miletic, S., Simic, V., & Karagoz, S. (2021). End-of-life tire management: A critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 68053–68070.
<https://doi.org/10.1007/s11356-021-16253-8>
- Departamento Nacional de Planeación. (2016). Documento CONPES 3874. Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos. DNP.
<https://www.anla.gov.co/eureka/documentos-estrategicos/politicas/politica-nacional-para-la-gestion-integral-de-residuos-solidos-pngrs-residuos-solidos-gestion-integral-de-residuos-solidos-documento-conpes-3874-de-2016>
- El Tiempo. (2016, octubre 24). El reciclaje de llantas, un mercado que todavía falta por explorar. *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/vida/ciencia/reciclaje-de-llantas-en-colombia-52722>

Ellen MacArthur Foundation. (2024). Annual impact report 2024.

<https://ellenmacarthurfoundation.org/annual-impact-report-2024-our-impact-stories>

Federal Highway Administration. (2020). Resource responsible use of recycled tire rubber in asphalt pavements (FHWA-HIF-20-043). U.S. Department of Transportation.

<https://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/hif20043.pdf>

Flick, U. (2023). An introduction to qualitative research (7th ed.). SAGE Publications.

<https://uk.sagepub.com/en-gb/eur/an-introduction-to-qualitative-research/book278983>

Galea, A., & Capelo, L. (2018). Applied deep learning with Python: Use scikit-learn, TensorFlow, and Keras to create intelligent systems and machine learning solutions (1st ed.). Packt.

Goevert, D. (2024). The value of different recycling technologies for waste rubber tires in the circular economy: A review. *Frontiers in Sustainability*, 4, 1282805.

<https://doi.org/10.3389/frsus.2023.1282805>

Govindan, K., & Bouzon, M. (2018). From a literature review to a multi-perspective framework for reverse logistics barriers and drivers. *Journal of Cleaner Production*, 187, 318–

337. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.040>

GPM Global. (2025). The GPM P5 standard for sustainability in project management (Version

3.1). GPM Global. <https://www.gpm.org/standards-and-publications/the-p5-standard>

Hernández-Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2023). Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. McGraw-Hill Interamericana.

Industriambiente. (2025). SIGNUS Ecovalor impulsa la economía circular: 27 millones de neumáticos reutilizados y reciclados en 2024.

<https://www.industriambiente.com/noticias/20250729/memoria-sostenibilidad-signus-2024-industriambiente>

Instituto de Desarrollo Urbano. (2011). Especificaciones técnicas de construcción ET-2011, Sección 560-11: Mezclas asfálticas con grano de caucho reciclado. Alcaldía Mayor de Bogotá.

Instituto Nacional de Vías. (2013). Especificaciones generales de construcción de carreteras, Artículo 413-13: Mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho reciclado. INVIAS.

Instituto Nacional de Vías. (2022). Especificaciones generales de construcción de carreteras [Resolución 4561 de 2022]. INVIAS.

James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2023). An introduction to statistical learning: With applications in Python (1st ed.). Springer International Publishing.
<https://doi.org/10.1007/978-3-031-38747-0>

Kosmützky, A. (2020). Between context and comparability: Exploring new solutions for a familiar methodological challenge in qualitative comparative research. Higher Education Quarterly, 74(2), 187–200. <https://doi.org/10.1111/hequ.12255>

Krippendorff, K. (2019). Content analysis: An introduction to its methodology (4th ed.). SAGE.
<https://us.sagepub.com/en-us/nam/content-analysis/book258450>

Lo Presti, D. (2013). Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. Construction and Building Materials, 49, 863–881.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.007>

Martínez-Arguelles, G., Caicedo, B., González, D., Celis, L., Fuentes, L. G., & Torres, V.

(2018). Trece años de continuo desarrollo con mezclas asfálticas modificadas con Grano de Caucho Reciclado en Bogotá: Logrando sostenibilidad en pavimentos.

Revista de la Construcción, 17(1), 41–54. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-50732018000100041&script=sci_arttext

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Resolución 1326 de 2017, por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. 50.287.

<https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-1326-de-2017/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). Llantas usadas: Gestión posconsumo en Colombia. <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/llantas-usadas/>

Ministerio del Medio Ambiente de Chile. (2016). Ley 20.920, que establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje [Decreto Supremo N° 8/2019]. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1090894>

Müller, A. C., & Guido, S. (2017). Introduction to machine learning with Python: A guide for data scientists. O'Reilly Media.

Padilla, L., Díaz, Á., & Anzules, W. (2025). Eco-management of end-of-life tires: Advances and challenges for the Ecuadorian case. Waste Management & Research, 43(2), 181–191. <https://doi.org/10.1177/0734242X241237104>

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J.,

- Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71.
<https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Park, J., Díaz-Posada, N., & Mejía-Dugand, S. (2018). Challenges in implementing the extended producer responsibility in an emerging economy: The end-of-life tire management in Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 189, 754–762.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.104>
- Peláez Arroyave, G. J., Velásquez Restrepo, S. M., & Giraldo Vásquez, D. H. (2017). Aplicaciones de caucho reciclado: Una revisión de la literatura. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27(2), 27–50. <https://www.redalyc.org/journal/911/91150559002/html/>
- Rebala, G., Ravi, A., & Churiwala, S. (2019). *An introduction to machine learning* (1st ed.). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15729-6>
- Reciclanip. (2023). Relatório anual 2023. <https://www.reciclanip.org.br>
- Rincón-Maldonado, M., & Hultman, M. (2024). Circular economy in Latin America and the Caribbean: Drivers, opportunities, barriers and strategies. *Sustainable Production and Consumption*, 50, 224–239. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.07.008>
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2024). Conozca los 92 puntos de recolección de llantas en Bogotá. <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/ambiente/conozca-los-92-puntos-de-recoleccion-de-llantas-en-bogota>

Secretaría Distrital de Ambiente, & Secretaría Distrital de Movilidad. (2011). Resolución 6981 de 2011, por la cual se dictan lineamientos para el aprovechamiento de llantas y neumáticos usados en el Distrito Capital. Alcaldía Mayor de Bogotá.

SIGNUS Ecovalor. (2023). Memoria de sostenibilidad 2023. <https://www.signus.es>

SIGNUS Ecovalor. (2025). Nuevos pavimentos asfálticos más silenciosos gracias al uso de granulado de caucho reciclado: Resultados del proyecto PERSEUS.
<https://www.signus.es/nuevos-pavimentos-asfalticos-mas-silenciosos-gracias-al-uso-de-granulado-de-caucho-reciclado/>

Theodoridis, S. (2015). Machine learning: A Bayesian and optimization perspective (1st ed.). Elsevier Science & Technology. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-19102-7>

World Business Council for Sustainable Development. (2019). Global ELT management: A global state of knowledge on regulation, management systems, impacts of recovery and technologies. WBCSD. <https://www.wbcsd.org/resources/global-elt-management/>