FUNDACIÓN UNIVERSITARIA AGRARIA DE COLOMBIA

UNIAGRARIA

Ingeniería Industrial

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE VALORIZACIÓN DE RESIDUOS EN LA CADENA DE SUMINISTRO DEL CANNABIS SATIVA PARA LA AGROINDUSTRIA COLOMBIANA DESDE LA ECONOMÍA CIRCULAR

ANALYSIS OF WASTE VALORIZATION ALTERNATIVES IN THE CANNABIS SATIVA SUPPLY CHAIN FOR THE COLOMBIAN AGROINDUSTRY FROM A CIRCULAR ECONOMY PERSPECTIVE

Línea de Investigación Institucional del programa: Gestión de Operaciones
Línea de investigación institucional: Medio Ambiente y Sociedad

Presentado por:

Luisa Fernanda Puentes Barrera

puentes.luisa@uniagraria.edu.co

Director

Giovanny Morantes Zapata

morantes.giovanny@uniagraria.edu.co

Bogotá D.C., Colombia 2026

Contenido

Resumen 3
Abstract 4
1. Introducción 5
2. Planteamiento del problema: 7
2.1 Pregunta de investigación: 8
2.2 Objetivo general: 9
2.3 Objetivos específicos: 9
3. Justificación: 10
4. Estado del arte 13
5. Marco Referencial 19
5.1 Marco histórico 19
5.2 Marco teórico 22
5.3 Marco conceptual 24
5.4 Marco legal 31
5.5 Marco Geográfico 34
6. Diseño Metodológico 41
7. Resultados y Discusión 48
8. Conclusiones 85
9. Recomendaciones 89
10. Consideraciones Éticas y Legales 93
11. Referencias bibliográficas 94
Anexos 102

Resumen

La agroindustria de Cannabis sativa genera un volumen creciente de residuos tallos, hojas, raíces y biomasa post-extracción que en Colombia continúan siendo subutilizados pese a su potencial de aprovechamiento, lo que limita la sostenibilidad ambiental y económica de la cadena de suministro. Frente a esta problemática, el objetivo de la presente investigación fue analizar la gestión de residuos en la cadena de suministro de *Cannabis sativa* desde un enfoque de economía circular, mediante una revisión bibliográfica sistemática, con el fin de identificar oportunidades de valorización e integración de tecnologías de la Industria 4.0 que contribuyan a una gestión más sostenible y eficiente. La metodología se fundamentó en una revisión documental y bibliométrica (VOSviewer) de literatura publicada entre 2000 y 2026, complementada con una matriz de evaluación técnica, ambiental y económica de las alternativas identificadas.

Los resultados muestran que la literatura reporta los tallos y demás fracciones lignocelulósicas como la mayor corriente residual de la cadena, equivalente a entre el 60 % y el 80 % de la biomasa generada en el proceso productivo, y que la investigación se ha concentrado en los tallos, mientras hojas y raíces permanecen poco exploradas: del corpus de 41 estudios, el 29,3 % aborda tallos, el 26,8 % semillas, el 24,4 % flores o inflorescencias, el 17,1 % hojas y apenas el 9,8 % raíces, mientras que cerca de un tercio de los estudios (34,1 %) trata el residuo de forma general sin especificar la fracción de la planta (los porcentajes no suman 100 % porque varios estudios abordan más de una fracción a la vez, por ejemplo tallo y hoja en el mismo trabajo). La matriz multicriterio evidenció que las rutas de aprovechamiento material (fibras, biocompuestos, materiales de construcción) presentan mayor madurez tecnológica que las de mayor transformación (bioplásticos, biorrefinería, ácidos grasos volátiles), que ofrecen más valor agregado, pero requieren validación adicional, y que el compostaje constituye la ruta de mayor factibilidad para las fracciones que no admiten usos de mayor valor. Asimismo, se identificó una integración aún limitada entre las tecnologías de Industria 4.0 (IoT, trazabilidad digital, sensores) y la gestión específica de residuos de cannabis, pese a su potencial reconocido en otras cadenas agroindustriales.

Se concluye que la economía circular en esta cadena no depende de una única alternativa, sino de la articulación de distintas rutas según el tipo de corriente residual, su madurez técnica y sus beneficios ambientales y económicos; sin embargo, su implementación en Colombia requiere estudios locales de volúmenes, costos y ciclo de vida que hoy no existen.

Palabras clave: Economía circular, Cannabis sativa, valorización de biomasa, biorrefinería, sostenibilidad industrial.

Abstract

The Cannabis sativa agro-industry generates a growing volume of waste, stalks, leaves, roots, and post-extraction biomass, that remains underutilized in Colombia despite its potential for valorization, thereby limiting the supply chain's environmental and economic sustainability. Addressing this issue, this research aimed to analyze waste management within the Cannabis sativa supply chain through a circular economy lens. A systematic literature review was conducted to identify opportunities for valorization and the integration of Industry 4.0 technologies that could foster more sustainable and efficient management. The methodology relied on a documentary and bibliometric review (using VOSviewer) of literature published between 2000 and 2026, complemented by a technical, environmental, and economic assessment matrix of the identified alternatives.

The results show that the literature identifies stalks and other lignocellulosic fractions as the supply chain's largest residual stream, accounting for 60% to 80% of the biomass generated during production and that research has focused primarily on stalks, leaving leaves and roots relatively unexplored. Within the corpus of 41 studies, 29.3% address stalks, 26.8% seeds, 24.4% flowers or inflorescences, 17.1% leaves, and only 9.8% roots, while nearly a third (34.1%) discuss the residue in general terms without specifying the plant fraction (percentages do not total 100% because several studies cover more than one fraction simultaneously, such as stalks and leaves in the same paper). The multi-criteria matrix revealed that material utilization pathways (fibers, biocomposites, construction materials) exhibit greater technological maturity than pathways involving more extensive transformation (bioplastics, biorefining, volatile fatty acids)—which offer higher added value but require further validation—and that composting is the most feasible route for fractions unsuitable for higher-value applications. Furthermore, the analysis identified limited integration between Industry 4.0 technologies (IoT, digital traceability, sensors) and specific cannabis waste management, despite their recognized potential in other agro-industrial supply chains.

The study concludes that the circular economy within this supply chain does not rely on a single alternative but rather on the coordination of various pathways based on the waste stream type, technical maturity, and environmental and economic benefits. However, implementing this

approach in Colombia requires local studies on waste volumes, costs, and life cycle assessment data that are currently unavailable.

Keywords: Circular economy, Cannabis sativa, biomass valorization, biorefinery, industrial sustainability.

1. Introducción

El crecimiento acelerado de la agroindustria de Cannabis sativa a nivel mundial ha impulsado una transformación estructural en las economías agrícolas contemporáneas, estimulado principalmente por la expansión de los mercados medicinales, científicos e industriales. En el contexto colombiano, este sector adquirió una relevancia estratégica sin precedentes a partir del desarrollo de un marco regulatorio progresivo y formalizado entre los años 2016 y 2021. Dicha apertura normativa permitió capitalizar las ventajas agroclimáticas excepcionales del territorio nacional y fomentar la inserción de productores en dinámicas comerciales de alto valor agregado. No obstante, la rápida expansión de las operaciones de cultivo, procesamiento y extracción ha traído consigo un incremento exponencial y crítico en la tasa de generación de residuos vegetales. Las fracciones lignocelulósicas compuestas por tallos, hojas, raíces y biomasa post-extracción continúan siendo subutilizadas en el entorno nacional debido a la persistencia de modelos lineales de gestión.

Esta problemática central restringe de manera directa la rentabilidad de las organizaciones, limita la competitividad e incrementa la huella ecológica de una industria emergente, evidenciando una brecha sustancial entre el potencial biológico del recurso y las prácticas operacionales vigentes en el país. Frente a la necesidad identificada de optimizar el flujo de estos materiales, la presente monografía abordó el análisis sistemático del sistema de gestión de residuos en la cadena de suministro de Cannabis sativa adoptando como eje articulador el paradigma de la economía circular. Bajo este enfoque teórico y operativo, los subproductos biológicos dejan de concebirse como pasivos ambientales o desechos destinados a la eliminación definitiva para ser integrados como materias primas secundarias en nuevos ciclos de valor.

El propósito de este estudio se centró en proveer un marco conceptual y práctico para analizar alternativas de valorización, fundamentadas en estrategias de biorrefinería y el aprovechamiento en cascada, procurando retener el valor de la biomasa el mayor tiempo posible dentro del sistema productivo. Asimismo, la monografía examinó el potencial de incorporar tecnologías emergentes

de la Industria 4.0 tales como sensores inteligentes, analítica de datos, sistemas de trazabilidad digital e Internet de las Cosas (IoT) como herramientas críticas para optimizar el monitoreo y garantizar un control transparente de las corrientes residuales en las cadenas agroindustriales. Para resolver esta problemática de forma estructurada, esta monografía estableció como objetivo general analizar, mediante una revisión sistemática, la gestión de residuos en la cadena de suministro de Cannabis sativa bajo el enfoque de economía circular. Con el propósito de dar cumplimiento a esta meta, se formularon objetivos específicos orientados a caracterizar las corrientes residuales por etapa y composición, comparar las alternativas de aprovechamiento mediante criterios técnicos, ambientales y económicos, y determinar el potencial específico de las herramientas tecnológicas de la Industria 4.0 dentro del sector agroindustrial colombiano. Metodológicamente, el estudio se rigió por un diseño no experimental con un enfoque mixto (cualitativo y cuantitativo). La identificación, selección y consolidación del corpus documental se fundamentó estrictamente en las directrices internacionales de la declaración PRISMA. A través de búsquedas sistemáticas en la base de datos Scopus asociadas a la ventana temporal 2000-2026, se depuró un total de **9.487** registros únicos hasta conformar un corpus definitivo de 41 artículos científicos indexados sujetos a síntesis cualitativa y cuantitativa. De forma complementaria, se aplicó un análisis bibliométrico computacional mediante el software VOSviewer para mapear redes de coocurrencia conceptual y se estructuró una matriz de evaluación multicriterio para jerarquizar las rutas de aprovechamiento identificadas. Los resultados muestran que la literatura reporta los tallos como la principal corriente residual, equivalente a entre el 60 % y el 80 % de la biomasa generada en el proceso productivo (Pérez Aguilar et al., 2023), y que dentro del corpus analizado el tallo constituye el residuo más estudiado, (29,3 % de los 41 estudios), mientras que las hojas (17,1 %) y raíces (9,8 %) permanecen relegadas en la investigación actual.

A partir de los hallazgos analizados, el desarrollo de esta monografía permite concluir que la transición efectiva hacia un modelo de economía circular en la cadena de suministro de cannabis no depende de la adopción de una solución única o aislada. Por el contrario, se requiere la articulación secuencial de múltiples rutas de aprovechamiento en función de la composición fisicoquímica de la corriente residual, su madurez técnica y la viabilidad económica del entorno operativo. Asimismo, se concluye que la implementación práctica de estas estrategias circulares en Colombia se encuentra condicionada por la ausencia de estudios locales rigurosos relacionados con la cuantificación de volúmenes regionales, análisis detallados de costos logísticos y evaluaciones formales de análisis de ciclo de vida.

Finalmente, este trabajo de investigación se inscribe y aporta directamente al pilar misional de sustentabilidad ambiental de la Fundación Universitaria Agraria de Colombia (UNIAGRARIA) y a su enfoque de desarrollo regional "SER". El documento se encuentra estructurado en

capítulos sucesivos que abarcan el planteamiento del problema, los marcos de referencia teórica y legal, el diseño metodológico detallado, la presentación y discusión analítica de los resultados, finalizando con las conclusiones y recomendaciones formuladas para incentivar la optimización de los recursos en el agro colombiano.

2. Planteamiento del problema:

Durante la última década, la agroindustria de Cannabis sativa ha experimentado un crecimiento significativo a nivel mundial impulsado por la expansión de los mercados medicinales, científicos e industriales. En Colombia, este sector ha ganado relevancia debido a las condiciones agroclimáticas favorables, el fortalecimiento del marco regulatorio y el potencial de participación en mercados internacionales de alto valor agregado(Rivera, 2019)

Como consecuencia de este crecimiento, se ha incrementado la generación de residuos a lo largo de la cadena de suministro, especialmente durante las etapas de cultivo, cosecha, procesamiento y extracción. Estos residuos incluyen tallos, hojas, raíces, semillas y biomasa postextracción, materiales que representan una proporción significativa de la planta y que, en muchos casos, son descartados o destinados a procesos de bajo aprovechamiento (Robertson et al., 2023)

El problema central radica en el insuficiente aprovechamiento y valorización de los residuos generados por la agroindustria del Cannabis sativa en Colombia. Estudios desarrollados en el departamento del Cauca evidencian que aproximadamente el 60 % y el 80 % de la biomasa obtenida durante el proceso productivo corresponde a coproductos o materiales potencialmente aprovechables. Esta situación refleja una brecha importante entre la cantidad de residuos generados y las alternativas implementadas para su reincorporación en cadenas de valor sostenibles. (Pérez Aguilar et al., 2023)

Entre las principales causas de esta problemática se encuentra la persistencia de modelos tradicionales de gestión de residuos; las prácticas más comunes dentro de la industria continúan siendo el compostaje, la digestión anaerobia, la incineración y la disposición final, estrategias que, aunque permiten controlar los residuos, limitan significativamente la recuperación de materiales y la generación de valor agregado.(Robertson et al., 2023)

A esta situación se suma la limitada implementación de enfoques de economía circular y biorrefinería. Diversos estudios han demostrado que la biomasa residual del cannabis puede convertirse en una fuente de materias primas para la producción de biocombustibles, bioquímicos y biomateriales, favoreciendo el cierre de ciclos productivos y el aprovechamiento integral de los recursos biológicos (Meza-Sepúlveda et al., 2021)

Así mismo, investigaciones recientes evidencian que los residuos de Cannabis sativa pueden emplearse en la fabricación de biopolímeros y materiales sostenibles con aplicaciones industriales, contribuyendo a reducir la dependencia de materias primas convencionales y promoviendo procesos productivos más sostenibles (Pérez Aguilar et al., 2023)

De manera complementaria, demostraron la viabilidad de obtener nanocelulosa a partir de residuos vegetales del cannabis mediante procesos de hidrólisis química, generando materiales con potencial aplicación en empaques, adhesivos y productos avanzados de base biológica. Estos resultados evidencian las oportunidades tecnológicas existentes para valorizar residuos que actualmente presentan bajos niveles de aprovechamiento. (Hancock et al., 2023)

La insuficiente valorización de estos materiales genera diversos efectos negativos. Desde la perspectiva ambiental, incrementa la cantidad de biomasa que requiere tratamiento o disposición final, desaprovechando recursos con potencial de reutilización. En términos económicos, limita la creación de nuevas líneas de negocio y la competitividad de una industria emergente, en la medida en que la viabilidad del aprovechamiento depende del valor de mercado que alcanzan los materiales recuperados & Rut(Rodrigo Ilarri & Rodrigo Clavero, 2024)

A nivel internacional, se han identificado múltiples aplicaciones para los residuos de Cannabis sativa, incluyendo fibras textiles, bioplásticos, biocompuestos, bioenergía y materiales para la construcción sostenible. Destacan que el aprovechamiento de estos subproductos constituye una de las principales estrategias para impulsar modelos de economía circular y bioeconomía dentro del sector. (Almeida Barbosa, 2026)

En consecuencia, surge la necesidad de analizar la gestión de residuos generados en la cadena de suministro de Cannabis sativa desde un enfoque de economía circular, con el propósito de identificar oportunidades de valorización que permitan transformar la biomasa residual en recursos de valor agregado, fortaleciendo la sostenibilidad ambiental, económica y social de esta agroindustria en Colombia.

2.1 Pregunta de investigación:

¿Cómo pueden gestionarse y valorizarse, bajo un enfoque de economía circular, los residuos generados por los cultivadores y licenciatarios de Cannabis sativa en la cadena de suministro colombiana?

Preguntas de investigación auxiliares

- ¿Cuáles son los principales tipos de residuos generados en las diferentes etapas de la cadena de suministro de Cannabis sativa?

- ¿Qué alternativas de valorización de estos residuos han sido reportadas en la literatura bajo un enfoque de economía circular y cuáles son sus implicaciones técnicas, ambientales y económicas?
- ¿Qué tecnologías asociadas a la Industria 4.0 pueden aplicarse en la gestión de residuos en la cadena de suministro de Cannabis sativa y cuál es su potencial en términos de trazabilidad, monitoreo y optimización de procesos?

2.2 Objetivo general:

Analizar, mediante revisión sistemática, la gestión de residuos en la cadena de suministro de Cannabis sativa bajo economía circular, para identificar rutas de valorización y aportes de la Industria 4.0.

2.3 Objetivos específicos:

- Caracterizar los residuos generados en cada etapa de la cadena de suministro de Cannabis sativa, mediante revisión sistemática de literatura, para construir una tipología por etapa productiva y composición.
- Comparar las alternativas de valorización reportadas para dichos residuos, mediante una matriz multicriterio técnica, ambiental y económica, para jerarquizar las rutas de aprovechamiento según cada corriente residual.
- Identificar aportes de la Industria 4.0 a la trazabilidad y gestión de residuos agroindustriales, mediante análisis bibliométrico y documental de casos reportados, para determinar su potencial en el cannabis colombiano.

3. Justificación:

La gestión de residuos en la agroindustria de Cannabis sativa representa un desafío creciente debido a la expansión global de esta industria y al incremento de biomasa residual generada a lo largo de su cadena de suministro. Durante las etapas de cultivo, cosecha, procesamiento y extracción se generan residuos como tallos, hojas, raíces, semillas y biomasa postextracción, materiales que poseen un importante potencial de aprovechamiento, pero que continúan siendo subutilizados en numerosos sistemas productivos. Esta situación adquiere especial relevancia desde la perspectiva ambiental, ya que la disposición inadecuada de residuos vegetales y otros subproductos puede generar impactos negativos sobre los recursos naturales, incrementar la presión sobre los sistemas de gestión de residuos y limitar la sostenibilidad de la agroindustria (Robertson et al., 2023)

Bajo el enfoque de economía circular, los residuos derivados de *Cannabis sativa* dejan de concebirse como desechos y pasan a considerarse recursos capaces de reincorporarse a nuevos ciclos productivos. En este contexto, la valorización de residuos constituye una estrategia fundamental para promover el aprovechamiento eficiente de los recursos y reducir la dependencia de materias primas convencionales. Diversas investigaciones han demostrado que la biomasa residual del cannabis puede emplearse para la producción de biocompuestos, bioetanol, biogás, materiales de construcción, biocarbón, papel y textiles (Pérez Aguilar et al., 2023).

Esta valorización beneficia de manera directa a distintos actores de la cadena productiva: las empresas licenciatarias de cannabis medicinal, que pueden reducir sus costos de disposición de residuos e incorporar nuevas líneas de negocio a partir de subproductos antes descartados; los pequeños y medianos cultivadores registrados, para quienes el aprovechamiento de tallos y biomasa representa una fuente adicional de ingresos y una vía de diversificación productiva; las autoridades ambientales regionales, que ven facilitada su labor de gestión al disminuir el volumen de biomasa que requiere tratamiento o disposición final; y los programas académicos de ingeniería, que encuentran en estos procesos un campo fértil para la investigación aplicada, la formación de nuevas capacidades técnicas y el desarrollo de proyectos de innovación en biorrefinería.

Una revisión reciente reporta que los tallos representan aproximadamente el 48,2 % de los residuos más estudiados en la literatura, mientras que las hojas y raíces continúan siendo materiales poco explorados a pesar de su potencial de aprovechamiento. Estos resultados

evidencian oportunidades significativas para la generación de valor agregado a partir de residuos que actualmente presentan bajos niveles de utilización (Almeida Barbosa, 2026)

En el contexto colombiano, esta investigación adquiere una importancia estratégica debido al crecimiento sostenido de la industria del cannabis medicinal y a la limitada implementación de alternativas de valorización de residuos. Un estudio desarrollado en el departamento del Cauca, por cada kilogramo de inflorescencia de cannabis cosechada se generan entre 1,5 y 4,5 kilogramos de tallo, un subproducto actualmente considerado de bajo valor y frecuentemente descartado, lo que equivale a entre el 60 % y el 80 % de la biomasa total generada en el proceso productivo. (Pérez Aguilar et al., 2023) Esta situación evidencia una brecha entre el potencial de aprovechamiento identificado por la literatura científica y las prácticas actualmente implementadas en el país, restringiendo las oportunidades de innovación, competitividad y sostenibilidad dentro de la cadena de suministro.

Desde la perspectiva económica, el aprovechamiento de residuos puede contribuir a la diversificación de la cadena productiva, la reducción de costos asociados a la gestión de desechos y la generación de nuevas fuentes de ingresos derivadas de biomateriales, bioenergía y bioproductos. De igual manera, la implementación de modelos de economía circular favorece la creación de valor agregado y fortalece la competitividad de sectores emergentes como la agroindustria del cannabis. A nivel social, estas estrategias pueden impulsar el desarrollo de economías rurales, fomentar la generación de empleo y promover modelos productivos más sostenibles alineados con los principios de la bioeconomía (Meza-Sepúlveda et al., 2021)

Adicionalmente, la investigación resulta pertinente debido a la creciente necesidad de incorporar tecnologías asociadas a la Industria 4.0 en la gestión de residuos agroindustriales. Herramientas como el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial, la analítica de datos, los sensores inteligentes y los sistemas de trazabilidad digital permiten optimizar el monitoreo de materiales, mejorar la toma de decisiones y aumentar la eficiencia de los procesos dentro de las cadenas de suministro. Sin embargo, la literatura relacionada con la aplicación de estas tecnologías en la gestión de residuos de Cannabis sativa aún es limitada, especialmente en países emergentes, lo que evidencia un vacío de conocimiento y una oportunidad para futuras investigaciones.

Asimismo, la literatura reciente resalta la importancia de desarrollar mecanismos que permitan evaluar el impacto de las iniciativas de valorización de residuos en términos de sostenibilidad y su contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente al ODS 12 (Producción y Consumo Responsables), mediante el aprovechamiento eficiente de los recursos y la reducción de residuos; al ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), a través de la incorporación de tecnologías innovadoras para optimizar los procesos de gestión; y al ODS 13

(Acción por el Clima), al favorecer prácticas que contribuyen a disminuir los impactos ambientales asociados a la disposición inadecuada de los residuos.(Tramarico et al., 2026)

En este sentido, la experiencia regional en el aprovechamiento de residuos orgánicos agrícolas y forestales muestra que su valorización puede generar beneficios ambientales, económicos y sociales para las organizaciones y los territorios donde se desarrolla la actividad productiva (Chávez Porras & Rodríguez González, 2016)

Desde el campo de la Ingeniería Industrial, esta investigación aporta una visión integradora entre economía circular, gestión de residuos, sostenibilidad e Industria 4.0, permitiendo identificar oportunidades de mejora en la utilización de recursos, optimización de procesos y generación de valor a partir de residuos agroindustriales. Adicionalmente, la revisión bibliográfica sistemática y el análisis bibliométrico mediante VOSviewer facilitan la identificación de tendencias científicas, tecnologías emergentes, relaciones conceptuales y vacíos de investigación, fortaleciendo la comprensión del estado actual del conocimiento sobre la gestión de residuos en la cadena de suministro de Cannabis sativa.

Finalmente, esta investigación permitió identificar y caracterizar los principales residuos generados en las diferentes etapas de la cadena de suministro de Cannabis sativa, analizar las alternativas de valorización reportadas en la literatura científica y examinar el potencial de las tecnologías de Industria 4.0 para fortalecer la gestión sostenible de dichos residuos. De esta manera, se contribuyó a la construcción de una base de conocimiento que sirva como apoyo para futuras investigaciones y para la formulación de estrategias orientadas al aprovechamiento integral de la biomasa residual, favoreciendo el desarrollo de cadenas de suministro más sostenibles, eficientes y competitivas en Colombia.

El presente trabajo se enmarca en la misión institucional de la Fundación Universitaria Agraria de Colombia – UNIAGRARIA, la cual busca formar integralmente personas comprometidas con el conocimiento, la sustentabilidad ambiental, la cultura del emprendimiento y el desarrollo regional con enfoque territorial, mediante la docencia, la investigación y la extensión. En coherencia con este propósito misional, el presente documento aborda la valorización de residuos de biomasa de Cannabis sativa bajo un enfoque de economía circular, contribuyendo directamente al pilar de sustentabilidad ambiental al proponer alternativas para reducir la generación de desechos y disminuir la dependencia de materias primas convencionales. Asimismo, el estudio se articula con la vocación de desarrollo regional con enfoque territorial que caracteriza a la Institución, en la medida en que busca fortalecer una industria emergente con alto potencial de generación de empleo, ingresos e innovación en las regiones productoras del país.

De esta manera, el trabajo se inscribe dentro de la línea de investigación institucional Medio Ambiente y Sociedad, al aportar conocimiento aplicable a la solución de problemas ambientales derivados del manejo inadecuado de residuos agroindustriales, y dentro de la línea de investigación del programa de Ingeniería Industrial, en tanto propone alternativas de aprovechamiento de recursos que optimizan procesos productivos y generan valor agregado a partir de subproductos actualmente desaprovechados. Todo ello en concordancia con el SER uniagrarista (Sustentabilidad – Emprendimiento – Regionalización) que orienta las funciones sustantivas de la Institución.

4. Estado del arte

Factores impulsores de la economía circular en la gestión de residuos colombiana

Una investigación publicada en *Waste Management* analizó los factores que favorecen la transición de los sistemas de gestión de residuos hacia modelos de economía circular en Colombia. Los autores identificaron que las políticas públicas, la innovación tecnológica, la participación de actores sociales y el fortalecimiento institucional constituyen elementos clave para promover esquemas de aprovechamiento de residuos. Asimismo, el estudio destaca la existencia de barreras relacionadas con limitaciones tecnológicas y de articulación entre sectores productivos. Los hallazgos permiten comprender el contexto colombiano en materia de gestión de residuos y ofrecen un marco de referencia para la implementación de estrategias de valorización en industrias emergentes como la del Cannabis sativa (Calderón Márquez & Rutkowski, 2020)

Valor de mercado de los subproductos recuperados

La viabilidad económica de la valorización depende no solo de la disponibilidad de biomasa residual, sino de la estabilidad y transparencia de los precios que alcanzan los subproductos recuperados en el mercado. Un estudio publicado en Sustainability analizó los precios de subproductos reciclables (plásticos, metales, papel) obtenidos en plantas de tratamiento mecánico-biológico de residuos sólidos urbanos en la Comunidad Valenciana (España), encontrando que dichos precios presentan distribuciones estadísticas altamente variables (no gaussianas) y una notoria falta de transparencia pública, lo que dificulta evaluar de forma confiable la viabilidad económica de largo plazo de este tipo de esquemas de recuperación de materiales. Aunque este trabajo no aborda el cannabis ni el contexto colombiano, resulta útil para advertir que la sola disponibilidad de biomasa residual no garantiza su aprovechamiento económico, pues este depende también de la estabilidad de los mercados y de la fiabilidad de la

información de precios disponible para los subproductos obtenidos(Rodrigo Ilarri & Rodrigo Clavero, 2024)

Cadenas de valor de base biológica para el aprovechamiento de residuos agroindustriales

Un estudio de caso realizado en Colombia evaluó el potencial de las cadenas de valor de base biológica para la gestión de residuos provenientes de vainas de cacao. Los resultados demostraron que estos residuos pueden transformarse en productos de valor agregado mediante procesos de aprovechamiento biotecnológico, contribuyendo simultáneamente a la reducción de impactos ambientales y a la generación de oportunidades económicas. Los autores resaltan que la integración de los diferentes actores de la cadena productiva resulta fundamental para garantizar el éxito de los modelos de valorización. Esta investigación aporta evidencia sobre la viabilidad de implementar estrategias de economía circular en el contexto colombiano y ofrece elementos transferibles a otras cadenas agroindustriales, incluyendo la de Cannabis sativa. (Meza-Sepúlveda et al., 2021)

Valorización de residuos lignocelulósicos de Cannabis sativa mediante fermentación acidogénica

La literatura reciente evidencia que los residuos lignocelulósicos de la agroindustria del cannabis poseen un alto potencial para ser valorizados dentro de un modelo de economía circular. Se analizó la fermentación acidogénica de residuos de biomasa de cáñamo —hurds (HH) y una mezcla de hojas e inflorescencias (Mix)— en combinación con lactosuero, para la producción de ácidos grasos volátiles (AGV), obteniendo la mayor producción de ácido acético en mono-fermentación de la mezcla sin tratar (185 ± 57 mg HAc/g VS) y en co-fermentación de la mezcla con lactosuero, alcanzando hasta 651 ± 65 mg HAc/g VS. El estudio destacó que estos subproductos pueden convertirse en precursores de bioproductos de valor agregado, como proteína de célula única y poli-hidroxibutiratos (PHB), con una evaluación tecnoeconómica preliminar que estimó, para la mono-fermentación de hurds pretratados con álcali, ingresos potenciales de entre 710–1810 €/ha·año (ácido acético), 618–1577 €/ha·año (proteína de célula única) y 766–3722 €/ha·año (PHB). Estos resultados refuerzan la idea de que los residuos agrícolas del cannabis no deben ser gestionados como desecho, sino como materia prima para nuevos ciclos productivos, fortaleciendo así la lógica de circularidad(Moscariello et al., 2024)

Composición y aplicaciones de las fibras del tallo de cáñamo

Una revisión accesible en Redalyc proporciona una visión exhaustiva: en Colombia, por cada kilogramo de inflorescencia cosechada se generan entre 1.5 y 4.5 kg de tallo descartado; los tallos contienen entre 60 % y 80 % de fibras hurds (xilema) y entre 20 % y 40 % de fibras bast (floema). Estas fibras tienen aplicaciones potenciales en biocompuestos, bioetanol, biogás, concreto, biocarbón, papelería y textiles, evidenciando un panorama promisorio para la economía circular. (Pérez Aguilar et al., 2023)

Revisión sistemática sobre el manejo de residuos en plantas aromáticas y medicinales

Una revisión sistemática publicada en Sustainability (2023) analiza la gestión de residuos en plantas aromáticas y medicinales (MAPs), incluyendo al cannabis. Destaca que estos residuos pueden usarse para generación de energía (gasificación, combustión, digestión anaeróbica), transformación en biocombustibles, aplicación en agricultura y manufactura de productos químicos, cosméticos o farmacéuticos; además identifica un aumento notable de publicaciones recientes en el tema, especialmente desde 2019 en países como China, Italia, Francia e India.(Marcelino et al., 2023)

Extracción secuencial de compuestos valiosos de residuos de tallos (byproducts)

Otra investigación profundiza en el aprovechamiento de residuos de tallos mediante una extracción secuencial: se recuperan más del 93 % de los cannabinoides usando CO_2 supercrítico; el residuo restante se procesa para extraer flavonoides y azúcares, logrando una reducción del material original entre el 90 % y 99 %. Este enfoque de biorrefinería maximiza el aprovechamiento de biomasa residual, alineándose con los principios de economía circular. (de Aguiar et al., 2023)

Producción de biodiesel y bioenergía a partir de cannabis

Un estudio revisó el potencial del aceite de semillas de cáñamo para biodiésel: se demostró rendimiento superior al de otros cultivos como colza o soya, con rendimiento estimado de ~207 galones/ha, cumpliendo con normas ASTM D6751 y EN 14214; su viabilidad está limitada solo por estabilidad y viscosidad mejorables mediante aditivos (Malabadi et al., 2023)

Potencial de valorización de biomasa residual en Sudamérica

Una investigación desarrollada en *Sustainability* evaluó el potencial de aprovechamiento de residuos de biomasa en distintos países sudamericanos. Los autores identificaron oportunidades para la producción de bioenergía, biomateriales y otros productos de valor agregado a partir de residuos agrícolas y forestales. El estudio destaca que la región cuenta con una importante disponibilidad de biomasa residual que puede incorporarse a modelos de economía circular,

siempre que exista apoyo institucional, innovación tecnológica y fortalecimiento de capacidades locales. Los hallazgos proporcionan una visión regional relevante para contextualizar el aprovechamiento de residuos agroindustriales y respaldan la necesidad de explorar alternativas de valorización en sectores emergentes como la industria del Cannabis sativa. (Sampaolesi et al., 2023)

Gestión de residuos en la industria del cannabis medicinal

En esta investigación desarrollada en *Industrial Crops and Products* se abordan la gestión de residuos en el entorno del cannabis medicinal, señalando que la legislación vigente se ha convertido en el principal obstáculo para aprovechar la biomasa sobrante del cultivo y la extracción. A pesar de estas trabas, el estudio identifica oportunidades en la recuperación de nutrientes, el compostaje y la bioenergía. El balance de la investigación apunta a la necesidad de crear políticas y sistemas más sostenibles que faciliten la economía circular en toda la cadena productiva. (Robertson et al., 2023)

Aprovechamiento de residuos orgánicos agrícolas y forestales en Iberoamérica

Una revisión bibliográfica sobre el manejo de residuos sólidos orgánicos agrícolas y forestales en Iberoamérica sistematizó alternativas de aprovechamiento bajo el marco de las 3R (reducir, reutilizar, reciclar) y de prácticas de "Producción Más Limpia", incluyendo casos regionales como el uso de biodigestores para residuos de cosecha y el aprovechamiento de residuos forestales de poda y raleo. Este antecedente resulta pertinente para el procesamiento de Cannabis sativa, en la medida en que sitúa la valorización de sus residuos dentro de una trayectoria regional de gestión de biomasa agrícola y forestal, aunque el estudio no aborda directamente el cultivo de cannabis (Chávez Porras & Rodríguez González, 2016)

Industria emergente del cáñamo y manufactura de productos sostenibles

Una revisión sistemática publicada en *AgriEngineering* examinó el crecimiento de la industria mundial del cáñamo desde la perspectiva de los materiales y los procesos de manufactura. Los autores describen las principales cadenas de transformación de fibras, semillas y biomasa residual hacia productos como biocompuestos, materiales de construcción, textiles técnicos, papel, empaques biodegradables y bioplásticos. Asimismo, destacan la necesidad de desarrollar estándares de producción, mejorar la trazabilidad de la cadena de suministro e incorporar criterios de sostenibilidad para fortalecer la competitividad del sector. Este estudio aporta una visión integral de la industria del cáñamo y permite contextualizar las oportunidades de valorización de residuos dentro de un enfoque de economía circular. (Enarevba & Haapala, 2024)

Caracterización de subproductos de cáñamo para su valorización

Un artículo publicado en Agronomy evaluó el potencial de los subproductos derivados de la cadena del cáñamo. Tras analizar sus propiedades bioquímicas y minerales, confirmaron que estos desechos albergan nutrientes esenciales y compuestos con alta bioactividad. La investigación concluye que reincorporar estos elementos en la cadena productiva ya sea mediante enmiendas para el suelo, fertilizantes o biotecnología es una estrategia sólida de economía circular que justifica el aprovechamiento integral de la biomasa residual de Cannabis sativa. (Pieracci et al., 2025)

Producción de nanocristales de celulosa a partir de tallos de cannabis

Un nuevo estudio ha puesto el foco en los tallos de desecho de la Cannabis sativa, demostrando que pueden transformarse en nanocristales de celulosa. Este material es clave para sectores avanzados como la medicina, la farmacia y la ciencia de materiales. A través de métodos específicos de extracción y purificación, la investigación comprueba que es totalmente viable convertir estos residuos lignocelulósicos en recursos de alto valor económico. De este modo, el trabajo resalta cómo la innovación tecnológica puede convertir un desecho agrícola en una oportunidad de negocio sostenible dentro de la bioeconomía circular. (Das et al., 2025)

Revisión crítica sobre el cáñamo industrial y su valorización en bioproductos sostenibles

Una revisión publicada en *BioResources* analizó la anatomía del cáñamo industrial, sus prácticas agronómicas y las diferentes alternativas para valorizar su biomasa en productos sostenibles. El estudio destaca aplicaciones relacionadas con papel, textiles, materiales de empaque, biocompuestos, bioplásticos, biochar y materiales para construcción, además de resaltar los beneficios ambientales del cultivo, como la captura de carbono y la fitorremediación de suelos. Los autores identifican que uno de los principales desafíos actuales corresponde a la consolidación de cadenas de suministro eficientes que permitan aprovechar integralmente los residuos generados durante el procesamiento del cultivo. (Basak, 2025)

Producción de polisacáridos a partir de residuos agroindustriales

La obtención de polisacáridos industriales a partir de residuos vegetales fue el eje de un análisis que evaluó diversas alternativas de bioeconomía. La investigación identificó que múltiples fuentes de biomasa sobrante pueden procesarse para extraer compuestos de alta demanda en la biotecnología y la farmacia. De acuerdo con el estudio, este enfoque de economía circular no solo disminuye el volumen de desperdicios, sino que maximiza el valor de las cosechas. Este argumento resulta sumamente útil para respaldar el uso de los residuos de Cannabis sativa como insumos en nuevas cadenas productivas. (Maqsood et al., 2025)

Perspectivas de reutilización y reciclaje de residuos de Cannabis sativa

En lugar de desechar la biomasa sobrante del cannabis industrial, en el presente estudio se propone su revalorización a través de la economía circular. Los autores detallan que subproductos como las fibras y hojas tienen un alto potencial para convertirse en biocombustibles, materiales ecológicos y fertilizantes. Esta propuesta no solo busca disminuir el impacto ambiental del sector, sino también abrir nuevos nichos de mercado, una necesidad que resulta especialmente urgente para el contexto de la producción emergente en Colombia. (Almeida Barbosa, 2026)

Valorización termoquímica de residuos de cáñamo industrial

Una revisión reciente evaluó los avances en la valorización termoquímica de residuos de cáñamo mediante procesos como licuefacción hidrotermal, carbonización hidrotermal, pirólisis y gasificación. Los autores concluyen que estas tecnologías permiten convertir la biomasa residual en biocombustibles, biochar y productos químicos de alto valor agregado, contribuyendo a reducir la disposición final de residuos y fortalecer la economía circular. Además, proponen esquemas de procesamiento que optimizan el aprovechamiento integral del cultivo y disminuyen el impacto ambiental asociado a la gestión de residuos agrícolas. (Jolaoso et al., 2026)

5. Marco Referencial

5.1 Marco histórico

5.1.1 Antecedentes del cáñamo como cultivo industrial

El objeto de estudio de esta monografía no es la planta de Cannabis sativa en sí misma, sino la gestión de los residuos que genera su cadena de suministro. Comprender ese objeto exige reconstruir su trayectoria histórica en cuatro momentos: los usos industriales tradicionales del cáñamo, su reapertura regulatoria a partir de 1990, el desarrollo del marco legal colombiano entre 2016 y 2021, y el giro reciente hacia la circularidad que trata la biomasa residual como materia prima y no como desecho.

El cáñamo fue durante siglos un cultivo industrial de primer orden, empleado en la fabricación de fibras textiles, cordelería, velamen naval y papel gracias a la resistencia y durabilidad de sus fibras bast y hurd. Hacia mediados del siglo XX, sin embargo, la producción mundial de fibra de cáñamo cayó drásticamente: en Europa la superficie cultivada se redujo de forma sostenida tras la Segunda Guerra Mundial por el aumento de los costos de mano de obra y la sustitución por fibras sintéticas de menor costo (Cortés et al., 2024) A este factor económico se sumó un factor normativo: la incorporación del cáñamo en los tratados internacionales de fiscalización de estupefacientes, sin distinguir sus variedades no psicoactivas de la marihuana, llevó a su prohibición generalizada en buena parte de Europa y Norteamérica durante las décadas centrales del siglo, lo que provocó la pérdida de infraestructura de procesamiento y de conocimiento agronómico acumulado (Cherney & Small, 2016a)

5.1.2 El resurgimiento regulado, 1990-2015

A partir de la década de 1990 se inició un proceso de recuperación regulada del cáñamo industrial particularmente en Europa y Norteamérica, después de varias décadas de restricciones asociadas principalmente al contenido de cannabinoides de la planta. Este proceso no implicó una liberalización general del género *Cannabis*, sino la creación de esquemas regulatorios diferenciados para variedades destinadas a usos industriales y caracterizadas por bajos niveles de Δ9-tetrahidrocannabinol (THC). Desde 1990 numerosos países comenzaron a autorizar bajo licencia el cultivo y procesamiento de cáñamo industrial, mientras que también se podría identificar este periodo como parte del renovado interés por un cultivo con múltiples aplicaciones productivas.(Cherney & Small, 2016b)

En Europa, el contenido de THC se consolidó progresivamente como uno de los principales criterios técnicos para diferenciar el cáñamo industrial de las variedades de Cannabis con mayor potencial psicoactivo. La regulación europea estableció inicialmente un límite de 0,5 % de THC en 1984, posteriormente reducido a 0,3 % en 1987 y a 0,2 % en 1999. Este último valor se convirtió en un parámetro utilizado para determinar las variedades susceptibles de cultivo dentro de los sistemas regulatorios europeos y para establecer condiciones asociadas a las variedades certificadas. (Sgrò et al., 2016)

En Norteamérica, Canadá constituyó uno de los principales referentes de esta reapertura regulada. En 1998 se autorizó el cultivo de variedades de cáñamo con concentraciones de THC inferiores o iguales a 0,3 % en peso seco de las hojas y las inflorescencias, acompañando esta autorización con mecanismos de licenciamiento y control. Posteriormente, el desarrollo del sector canadiense se orientó principalmente hacia la producción de semillas y aceite, mientras que en Estados Unidos la producción comenzó a reintroducirse mediante programas piloto establecidos a partir de 2014. (Salehi et al., 2022)

Así, entre 1990 y 2015 se configuró un nuevo escenario productivo en el que el cáñamo industrial pasó de estar asociado principalmente con restricciones generales sobre *Cannabis* a ser reconocido como un cultivo sujeto a condiciones técnicas específicas. El establecimiento de límites de THC permitió construir una diferenciación regulatoria entre materiales destinados a usos industriales y aquellos sometidos a controles diferentes por su concentración de cannabinoides. Esta transformación fue relevante para la recuperación de actividades agrícolas y manufactureras asociadas con fibras, semillas, aceites y otros derivados, y constituyó un antecedente para la posterior expansión de investigaciones orientadas al aprovechamiento integral de la biomasa generada por el cultivo y su transformación.(Cherney & Small, 2016b)

5.1.3 Colombia, 2016-2021

En Colombia, la apertura regulada del cannabis sigue una secuencia cronológica precisa. La Ley 1787 de 2016 estableció el marco para el acceso seguro e informado al uso médico y científico del cannabis, sentando las bases institucionales del sector, específicamente en la Ley 1787 de 2016. Un año después, el Decreto 613 de 2017 reglamentó dicha ley definiendo los tipos de licencia en uso de semillas, cultivo psicoactivo y no psicoactivo, y fabricación de derivados y sus requisitos de obtención. En 2018, el Decreto 822 amplió la regulación a los derivados no psicoactivos, facilitando su producción y comercialización con fines industriales y de exportación. Finalmente, el Decreto 811 de 2021 habilitó la exportación de flor seca con fines medicinales, reforzó los mecanismos de control normativo e introdujo incentivos orientados a la investigación y la innovación. El resultado acumulado de esta secuencia normativa se refleja en cifras concretas: para septiembre de 2020 ya se habían otorgado más de 656 licencias y más de

4.191 registros para pequeños y medianos cultivadores consolidando en apenas cinco años una cadena de suministro formal que, sin embargo, heredó del período anterior la misma pregunta sin resolver sobre el destino de la biomasa residual generada en cada eslabón.(Acosta, 2020)

5.1.4 El giro hacia la circularidad: 2020 en adelante

A partir de 2020 se observa una evolución en la manera en que la literatura científica aborda los residuos derivados de *Cannabis sativa*, pasando progresivamente de una perspectiva centrada en su disposición y manejo como desecho hacia una visión orientada a su recuperación y valorización como recurso. Este cambio se encuentra relacionado con la consolidación de los enfoques de economía circular, bajo los cuales la biomasa residual deja de considerarse únicamente un material destinado a eliminación y comienza a analizarse como una fuente potencial de materias primas de origen renovable, energía y productos de valor agregado. En este sentido, se señala que el cannabis puede ser considerado una fuente de materia prima para la producción de productos químicos, combustibles y materiales, destacando el creciente interés por utilizar su biomasa como recurso renovable dentro de sistemas productivos más circulares.(Marcelino et al., 2023)

En este contexto, diferentes investigaciones han comenzado a estudiar el potencial de la biomasa de Cannabis sativa y del cáñamo industrial para su incorporación en procesos de valorización. Se analiza el potencial del cannabis como fuente de materia prima para la producción de productos químicos, combustibles y materiales, evidenciando la ampliación del interés científico hacia aplicaciones que trascienden los usos tradicionales de la planta. De manera complementaria, estudios posteriores han explorado alternativas como la producción de bioproductos, materiales de base biológica y compuestos de valor agregado a partir de diferentes fracciones de la biomasa. (Brar et al., 2024)

En consecuencia, el marco histórico permite observar una transformación progresiva del objeto de estudio: desde el cáñamo como cultivo industrial tradicional, pasando por su recuperación mediante procesos regulatorios, hasta llegar a un escenario en el que la biomasa residual adquiere interés como recurso potencial para nuevos procesos productivos. Esta evolución proporciona el contexto necesario para analizar posteriormente las alternativas de gestión, valorización y aplicación de tecnologías de la Industria 4.0 en la cadena de suministro de Cannabis sativa.

5.2 Marco teórico

El marco teórico articula los enfoques que orientan el análisis de los residuos de Cannabis sativa como recursos y no como desechos. La investigación se apoya en tres perspectivas complementarias: la jerarquía de gestión de residuos, que establece un orden de preferencia entre las alternativas de manejo (Chrispim et al., 2023); el marco de las R de la economía circular, que explica las formas en que los materiales conservan su valor dentro del sistema productivo (Diaz et al., 2021); y la biorrefinería con aprovechamiento en cascada, que plantea el uso secuencial e integral de la biomasa (Campbell-Johnston et al., 2020). En conjunto, estas perspectivas proporcionan los criterios con los que, en el capítulo de resultados, se comparan y jerarquizan las rutas de valorización identificadas.

La jerarquía de gestión de residuos.

La jerarquía de gestión de residuos constituye un marco de referencia para establecer prioridades en el manejo de los materiales descartados, buscando que las alternativas de mayor conservación de recursos sean consideradas antes de aquellas asociadas con la eliminación definitiva. Bajo este enfoque, la prevención ocupa el nivel prioritario, seguida de estrategias como la reutilización, el reciclaje y otras formas de valorización, mientras que la recuperación energética y la disposición final se consideran opciones posteriores cuando no resulta técnica o económicamente viable mantener los materiales dentro de ciclos productivos. Esta jerarquización permite orientar la toma de decisiones hacia alternativas que reduzcan la generación de residuos y conserven el valor incorporado en los materiales durante el mayor tiempo posible. (Chrispim et al., 2023)

En el contexto de la cadena de suministro de Cannabis sativa, esta perspectiva permite analizar las diferentes fracciones residuales de acuerdo con sus características físicas, químicas y potencial de aprovechamiento. De esta manera, los residuos con características adecuadas para aplicaciones de mayor valor agregado pueden priorizarse para la obtención de materiales, fibras, compuestos o productos de base biológica, mientras que las fracciones con menor calidad o mayor grado de degradación pueden destinarse a alternativas como compostaje, digestión anaerobia o valorización energética. Por tanto, la jerarquía de gestión de residuos constituye un criterio para comparar y ordenar las rutas de valorización analizadas posteriormente en esta investigación.

Marco de las R de la economía circular

Las estrategias de las R de la economía circular permiten explicar las diferentes formas mediante las cuales los materiales, productos y recursos pueden conservar su valor dentro del sistema

productivo. Aunque existen diferentes clasificaciones en la literatura, estas estrategias comprenden acciones como reducir, reutilizar, reparar, reacondicionar, remanufacturar, transformar para nuevos usos, reciclar y recuperar recursos o energía. Su importancia radica en que no todas las estrategias generan el mismo nivel de conservación del valor: las alternativas que actúan en etapas tempranas del ciclo tienden a evitar o disminuir la generación del residuo, mientras que las estrategias de recuperación intervienen cuando el material ya ha perdido parte de su valor original.(Diaz et al., 2021)

Para efectos de esta investigación, se emplea una adaptación de las R orientada al manejo de residuos agroindustriales, particularmente mediante las categorías de reducir, reutilizar, reciclar y recuperar. Estas categorías permiten relacionar las características de los residuos de Cannabis sativa con diferentes alternativas de aprovechamiento. Asimismo, el análisis debe distinguir entre ciclos biológicos y ciclos técnicos. Los ciclos biológicos corresponden a materiales de origen biológico que pueden reincorporarse mediante procesos como compostaje, digestión anaerobia o transformación bioquímica, mientras que los ciclos técnicos buscan mantener materiales y productos en uso mediante procesos de reutilización, recuperación, transformación y reciclaje.

En consecuencia, el marco de las R permite interpretar la valorización de los residuos de cannabis no únicamente como una actividad de disposición final, sino como un conjunto de estrategias orientadas a mantener los recursos en circulación y conservar su valor durante el mayor tiempo posible. Esta perspectiva servirá posteriormente para relacionar las alternativas de valorización identificadas con los principios de economía circular.

Biorrefinería y aprovechamiento en cascada

El concepto de biorrefinería hace referencia a un sistema integrado de transformación de biomasa mediante diferentes procesos que permiten obtener simultáneamente productos de valor agregado, materiales, compuestos químicos, combustibles o energía. A diferencia de un esquema convencional en el que una biomasa residual puede destinarse directamente a una única alternativa de aprovechamiento, el enfoque de biorrefinería busca aprovechar de manera integral sus diferentes fracciones y componentes, incrementando la eficiencia en el uso de los recursos. La literatura sobre biorrefinerías de residuos agroindustriales destaca precisamente la posibilidad de integrar diferentes rutas de transformación para generar productos de mayor valor y reducir los flujos destinados a disposición. (Yaashikaa et al., 2022)

Dentro de este enfoque se encuentra el aprovechamiento en cascada, entendido como la utilización secuencial de una misma biomasa en diferentes aplicaciones, procurando obtener

primero productos de mayor valor antes de destinar las fracciones remanentes a usos de menor valor. Este principio permite establecer una secuencia de aprovechamiento en la que, por ejemplo, una biomasa puede someterse inicialmente a la extracción de compuestos de interés, posteriormente utilizarse para la obtención de materiales y finalmente aprovechar la fracción residual para producción de energía o recuperación de nutrientes. El aprovechamiento en cascada ha sido propuesto como una estrategia compatible con la economía circular debido a que permite incrementar el valor obtenido de una misma corriente de biomasa y disminuir la cantidad de material que termina como residuo sin aprovechamiento. (Campbell-Johnston et al., 2020)

En el caso de Cannabis sativa, este enfoque resulta pertinente debido a la composición heterogénea de sus residuos y a la posibilidad de realizar procesos de extracción y transformación secuencial. Así, una fracción residual podría destinarse inicialmente a la recuperación de compuestos de mayor valor agregado; posteriormente, el material remanente podría emplearse en la producción de fibras, biomateriales u otros productos, mientras que las fracciones finales con menor potencial material podrían orientarse hacia compostaje, digestión anaerobia o valorización energética. Por tanto, el concepto de aprovechamiento en cascada proporciona un fundamento teórico para analizar las rutas de valorización no como alternativas aisladas, sino como etapas sucesivas de aprovechamiento de una misma corriente residual.

Esta perspectiva será utilizada en la presente investigación para analizar las alternativas de valorización de los residuos de Cannabis sativa, priorizando aquellas rutas que permitan conservar o incrementar el valor de la biomasa antes de recurrir a opciones de recuperación energética o disposición final.

5.3 Marco conceptual

Los siguientes conceptos se emplearon para explicar el problema de investigación y fundamentar el análisis de los resultados.

Cannabis sativa L

*E*s una especie vegetal perteneciente a la familia Cannabaceae, caracterizada por su amplia diversidad genética y por las múltiples aplicaciones industriales, medicinales y agrícolas que ofrece. Dentro de esta especie se distinguen diferentes variedades según su composición química, principalmente el contenido de Δ9-tetrahidrocannabinol (THC). En este contexto, el cáñamo industrial (hemp) corresponde a variedades con bajo contenido de THC, destinadas principalmente a la producción de fibra, semillas, biomasa y otros usos industriales, mientras que otras variedades se cultivan con fines medicinales para la obtención de cannabinoides como

el cannabidiol (CBD) y el THC, empleados en la industria farmacéutica y terapéutica. (Odieka et al., 2022)

Gestión de residuos

El concepto de "residuo" o "desperdicio" hace referencia a los materiales resultantes de los procesos de producción y consumo que no poseen un valor económico. En las naciones industrializadas, el elevado nivel de consumo provoca una mayor generación de desechos, lo que conlleva serios retos ambientales. Frente a esta situación, la gestión de los residuos sólidos se ha establecido como una prioridad nacional dentro de las políticas ambientales. La noción de "gestión integral de residuos" abarca todas las acciones orientadas al control y tratamiento de los flujos de desechos en la sociedad, con el objetivo de administrarlos de forma sostenible, garantizando la protección del entorno y de la salud pública. (Jiménez Martínez, 2017)

Cadena de suministro del Cannabis sativa (agroindustria)

La cadena de valor de Cannabis sativa se articula en siete fases interconectadas que abarcan desde el desarrollo del material vegetal hasta la comercialización y el aprovechamiento de subproductos:

1. **Selección genética y propagación:** Definición y multiplicación de cultivares específicos según su destino final (industrial, alimentario o medicinal).
2. **Cultivo:** Trabajo en campo o invernadero que incluye siembra, establecimiento de la planta, manejo agronómico y control fitosanitario.
3. **Cosecha y postcosecha:** Tareas de corte, secado, curado, clasificación, acondicionado y almacenamiento de la biomasa.
4. **Procesamiento y transformación:** Extracción y obtención de fibras, semillas, aceites y extractos mediante métodos como etanol, CO_2 supercrítico o hidrocarburos.
5. **Manufactura, formulación y empaque:** Desarrollo de los productos finales ajustados a normativas de calidad y estándares de la industria.
6. **Almacenamiento, logística y distribución:** Gestión de la cadena de frío y transporte para conservar la estabilidad del producto hasta su venta.
7. **Consumo y gestión de residuos:** Reincorporación de la biomasa descartada mediante modelos de economía circular, valorización de materiales, bioenergía y elaboración de bioproductos.

En este flujo, la postcosecha es un punto crítico: si el secado, curado y empaque no se regulan adecuadamente, se degradan los cannabinoides, terpenos y otros metabolitos de interés, generando pérdidas de rendimiento. Por ello, la investigación reciente enfatiza que la sostenibilidad del sector depende de integrar la trazabilidad digital, optimizar las prácticas de campo y aprovechar los residuos de cada fase para obtener biomateriales o compostaje. (López, 2021)

Cadena de suministro de Cannabis sativa y Humulus lupulus

Debido a su pertenencia a la familia Cannabaceae, Cannabis sativa y Humulus lupulus presentan semejanzas botánicas, fisiológicas y agronómicas que permiten establecer relaciones entre algunos de sus sistemas productivos. Ambas especies son plantas dioicas, presentan estructuras glandulares asociadas con la producción y acumulación de metabolitos secundarios y responden de manera importante a condiciones ambientales, prácticas de cultivo y manejo poscosecha. En el caso del cannabis, los tricomas glandulares constituyen estructuras relevantes para la acumulación de cannabinoides y otros metabolitos, mientras que en el lúpulo los tricomas glandulares de las inflorescencias femeninas producen compuestos como ácidos del lúpulo, aceites esenciales y flavonoides. Estas semejanzas no implican que ambas especies sean equivalentes desde el punto de vista productivo o químico, pero sí permiten considerar al lúpulo como un sistema vegetal de referencia para analizar determinados procesos de producción, transformación, control de calidad y aprovechamiento de biomasa. (Aryal et al., 2024)

Desde la perspectiva de la cadena de suministro, ambas actividades pueden representarse mediante una secuencia de etapas que comprende la selección y propagación del material vegetal, establecimiento y manejo del cultivo, cosecha, operaciones poscosecha, transformación, almacenamiento, distribución y llegada al consumidor o usuario industrial. En cada uno de estos eslabones se presentan entradas de materias primas, insumos, energía y agua, así como salidas asociadas con productos principales, subproductos y residuos. Esta representación permite analizar las cadenas no únicamente desde la perspectiva de la producción, sino también desde la gestión de flujos de materiales y la identificación de puntos en los cuales es posible reducir pérdidas o reincorporar recursos al sistema productivo. En el caso del cáñamo industrial, la literatura ha identificado oportunidades de valorización a lo largo de toda la cadena, desde la producción agrícola hasta el aprovechamiento de fibras, cañamiza, hojas, inflorescencias y otros componentes de la biomasa. (Budhathoki et al., 2024; Moscariello et al., 2022)

En Cannabis sativa, la etapa agrícola puede generar residuos y biomasa residual asociados con tallos, hojas, raíces y material vegetal descartado durante la cosecha y selección. Posteriormente,

durante el secado, acondicionamiento y transformación, pueden aparecer fracciones vegetales no utilizadas, materiales de empaque, residuos derivados de procesos de extracción y, dependiendo de la tecnología empleada, corrientes residuales asociadas con solventes, lodos o materiales de filtración. Esta diversidad aumenta cuando la materia prima se destina a diferentes líneas de transformación, como fibras, alimentos, cosméticos, extractos, productos farmacéuticos, biocompuestos o materiales de construcción. Por esta razón, la cadena del cannabis no debe entenderse como una secuencia lineal de producción y descarte, sino como un sistema en el que diferentes fracciones de la planta pueden adquirir funciones distintas y ser dirigidas hacia rutas de valorización específicas. La revisión de la cadena de valor del cáñamo evidencia precisamente que la diversificación de productos amplía las oportunidades de aprovechamiento de la biomasa y, al mismo tiempo, incrementa las necesidades de procesamiento, estandarización y control de calidad. (Aryal et al., 2024; Budhathoki et al., 2024)

En el caso de Humulus lupulus, la cadena productiva presenta una trayectoria industrial más consolidada, especialmente por su integración histórica con la industria cervecera. El producto de mayor interés comercial corresponde a las inflorescencias femeninas, utilizadas principalmente por sus propiedades aromáticas y amargantes. Sin embargo, la transformación y utilización del lúpulo también generan corrientes residuales y subproductos, entre ellos restos vegetales y lúpulo agotado después del proceso de elaboración de cerveza. Estos materiales contienen proteínas, celulosa, hemicelulosa, lignina, compuestos fenólicos, lípidos y otros compuestos de interés, por lo que pueden ser considerados recursos susceptibles de recuperación en lugar de residuos destinados exclusivamente a disposición final. La literatura reciente ha documentado alternativas de valorización de estos subproductos mediante aplicaciones alimentarias, obtención de compuestos bioactivos, bioenergía, biomateriales y otros productos de mayor valor agregado. (Claudia Salanță et al., 2023)

La comparación entre ambas cadenas permite identificar una característica relevante para el enfoque de economía circular: el residuo no se define únicamente por el material generado, sino por la posibilidad de reincorporarlo a otra etapa productiva o de dirigirlo hacia una nueva cadena de valor. En este sentido, los tallos y cañamiza del cannabis pueden orientarse hacia la obtención de fibras, materiales celulósicos, biocompuestos, biochar o productos energéticos, mientras que las hojas y otras fracciones de biomasa pueden ser consideradas materias primas para procesos de extracción, fermentación o biorefinería, siempre que sus características químicas, sanitarias y regulatorias lo permitan. De manera análoga, los subproductos del lúpulo pueden aprovecharse mediante procesos de extracción y transformación para recuperar compuestos de interés o generar nuevos materiales. Esta lógica de aprovechamiento escalonado permite pasar de un modelo lineal basado en producir–usar–desechar hacia uno en el que los flujos materiales son

identificados, clasificados y destinados a usos sucesivos de acuerdo con su potencial técnico y económico.(Moscariello et al., 2022)

No obstante, la principal diferencia entre ambas cadenas radica en el grado de consolidación industrial, la estructura de los mercados y el contexto regulatorio. El lúpulo cuenta con una cadena históricamente articulada alrededor de la producción de cerveza, lo que ha favorecido la estandarización de variedades, prácticas agrícolas, operaciones poscosecha, parámetros de calidad y relaciones entre productores, transformadores y compradores. En contraste, la cadena del *Cannabis sativa* presenta una mayor heterogeneidad debido a la coexistencia de diferentes finalidades productivas y a la evolución relativamente reciente de los mercados legales de cáñamo y cannabis medicinal e industrial en numerosos países. Esta situación se refleja también en la investigación disponible: una revisión sistemática de 98 estudios sobre la cadena de valor del cáñamo encontró que la literatura se concentra principalmente en Europa y Norteamérica y que existen oportunidades de investigación relacionadas con la viabilidad regional, la valorización de biomasa y el desarrollo de cadenas de valor en regiones del Sur Global. (Budhathoki et al., 2024)

La comparación también resulta pertinente para el análisis de la trazabilidad y el aseguramiento de la calidad. En ambas cadenas, las características de la materia prima pueden modificarse durante las etapas de cultivo, cosecha, almacenamiento y transformación, por lo que el seguimiento de variables como origen, variedad, condiciones de producción, humedad, tiempo de almacenamiento, tratamientos aplicados y destino de los subproductos puede contribuir a mantener la calidad y facilitar la toma de decisiones. En el caso del cáñamo, esta necesidad adquiere especial relevancia debido a la diversidad de productos finales y a la necesidad de controlar características específicas de la materia prima y de los productos derivados. (Aryal et al., 2024) señalan precisamente la existencia de necesidades de conocimiento en procesamiento, valorización de la planta completa y mecanismos estandarizados de control de calidad a lo largo de la cadena.

Desde esta perspectiva, la experiencia acumulada en cadenas agroindustriales más consolidadas, como la del lúpulo, puede utilizarse como referencia conceptual para identificar prácticas transferibles al análisis del cannabis, sin asumir que ambos sistemas poseen las mismas condiciones productivas o regulatorias. La comparación permite reconocer posibles estrategias relacionadas con la estandarización de operaciones, clasificación de materias primas, control de variables críticas, trazabilidad de lotes, aprovechamiento de subproductos y articulación entre productores y transformadores. Estas prácticas pueden complementarse con herramientas de la Industria 4.0, como sensores, Internet de las Cosas (IoT), sistemas de información, análisis de datos y tecnologías de trazabilidad, con el propósito de registrar los flujos de materiales y

determinar en qué puntos de la cadena se generan pérdidas o residuos con potencial de valorización.

En consecuencia, el análisis conjunto de Cannabis sativa y Humulus lupulus no pretende equiparar sus cadenas productivas, sino utilizar las semejanzas estructurales entre ambas como referencia para comprender cómo una cadena agroindustrial puede gestionar sus materiales desde la producción primaria hasta la transformación y el aprovechamiento de sus subproductos. Para la presente investigación, esta comparación resulta especialmente útil porque permite trasladar la discusión desde la simple identificación de residuos hacia una visión sistémica de la cadena de suministro, en la cual cada flujo residual puede evaluarse según sus características, posibilidades de recuperación, requerimientos de acondicionamiento, valor potencial y viabilidad de integración en nuevas cadenas productivas. De esta manera, la cadena de Cannabis sativa puede analizarse bajo un enfoque de economía circular orientado no solo a reducir la generación de residuos, sino también a maximizar el aprovechamiento de la biomasa, mejorar la eficiencia en el uso de recursos y generar oportunidades de valorización mediante procesos técnica, ambiental y económicamente viables. (Budhathoki et al., 2024; Moscariello et al., 2022)

Biomasa Lignocelulósica

Los residuos agroindustriales de naturaleza lignocelulósica representan una fuente potencial de materias primas para procesos de valorización, debido a su contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina. Estos componentes permiten su aprovechamiento en aplicaciones como producción de fibras, papel, biocompuestos, materiales de construcción, bioenergía y otros productos de base biológica, favoreciendo estrategias de economía circular y aprovechamiento integral de la biomasa (Andre et al., 2016; Moscariello et al., 2024)

En Cannabis sativa, los tallos constituyen una de las principales fracciones lignocelulósicas de la planta y pueden dividirse principalmente en fibras externas (bast) y una fracción interna leñosa denominada hurd o cañamiza. Las fibras bast, con mayor contenido de celulosa y características de resistencia y longitud, presentan potencial para aplicaciones textiles, papeleras y como refuerzo de materiales. Por su parte, los hurds, debido a su estructura más leñosa y porosa, han sido estudiados para materiales de construcción, biocompuestos y productos absorbentes(Lawson et al., 2022)

La valorización de estos residuos puede realizarse mediante diferentes operaciones de acondicionamiento y transformación. Entre las alternativas se encuentran procesos mecánicos, químicos y biológicos orientados a separar o modificar sus componentes para obtener fibras, celulosa, azúcares fermentables, biocombustibles y otros bioproductos. Asimismo, la integración de estas fracciones en esquemas de biorrefinería permite aprovechar diferentes componentes de

una misma biomasa y disminuir la cantidad de material destinado a disposición final (Moscariello et al., 2022; Tripathi et al., 2023)

Por lo tanto, los tallos de Cannabis sativa pueden considerarse una materia prima secundaria con potencial para generar nuevas cadenas de valor. Su aprovechamiento depende de factores como composición, humedad, acondicionamiento, transporte y costos de transformación, por lo que la selección de cada alternativa debe considerar criterios técnicos, ambientales y económicos. Desde esta perspectiva, la biomasa lignocelulósica constituye un flujo relevante para la gestión circular de residuos dentro de la cadena de suministro del cannabis (Moscariello et al., 2022)

Impacto medio ambiental.

El impacto ambiental se entiende como la modificación del entorno natural ocasionada tanto por acciones humanas como por fenómenos naturales. Dichos cambios pueden generar efectos favorables o desfavorables, los cuales pueden evidenciarse en el corto, mediano o largo plazo. Dentro de la agroindustria, los desechos producidos en las diferentes etapas de la cadena productiva pueden generar múltiples impactos ambientales, que se agrupan principalmente en tres tipos: la contaminación de recursos como el agua, el suelo y el aire; la disminución de la biodiversidad; y el incremento de los efectos asociados al cambio climático. (Pérez, 2017)

Economía Circular

La economía circular (EC) es un paradigma que promueve la recuperación y reutilización de materiales mediante ciclos productivos cerrados, favorables a la sostenibilidad ambiental, social y económica. Su enfoque contrasta con el modelo lineal tradicional de "producir, consumir y desechar". Aplicado a residuos de cannabis, este enfoque permite transformar materiales considerados desperdicio en insumos valiosos para nuevas aplicaciones productivas.

Un estudio reciente con enfoque en economía circular identificó múltiples alternativas innovadoras para aprovechar residuos de cannabis medicinal, como compostaje, generación de bioenergía y transformación en nuevos productos (Estrada Mejía, 2021)

5.4 Marco legal

La normatividad corresponde al conjunto de disposiciones jurídicas que establecen los principios, derechos, obligaciones y condiciones bajo las cuales se desarrollan las diferentes actividades productivas en Colombia. Para la presente investigación, el marco legal parte de las disposiciones constitucionales relacionadas con la protección del ambiente y el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales, y posteriormente aborda las normas ambientales y específicas aplicables a la cadena de suministro del Cannabis sativa.

La Constitución Política de Colombia de 1991 constituye el fundamento del marco jurídico ambiental colombiano. El artículo 8 establece el deber del Estado y de las personas de proteger las riquezas naturales de la Nación; el artículo 79 reconoce el derecho de todas las personas a gozar de un ambiente sano; y el artículo 80 establece que el Estado debe planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales para garantizar su desarrollo sostenible, conservación, restauración o sustitución, así como prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental. Estas disposiciones proporcionan el fundamento constitucional para promover actividades productivas orientadas al uso eficiente de los recursos y a la reducción de los impactos ambientales (Asamblea Nacional Constituyente, 1991)

En desarrollo de estos principios se encuentra la Ley 99 de 1993, mediante la cual se creó el Ministerio del Medio Ambiente y se organizó el Sistema Nacional Ambiental (SINA). Esta norma establece los fundamentos de la política ambiental colombiana y orienta la gestión, conservación y aprovechamiento de los recursos naturales bajo criterios de desarrollo sostenible. Su relación con la presente investigación se encuentra en la necesidad de gestionar los residuos generados en las actividades agroindustriales de manera que se prevenga el deterioro ambiental y se favorezca el aprovechamiento de los recursos (Congreso de la República de Colombia, 1993) .

En cuanto a la regulación específica del cannabis, la Ley 1787 de 2016 estableció un marco regulatorio para el acceso seguro e informado al uso médico y científico del cannabis y sus derivados en el territorio colombiano. La norma contempla actividades relacionadas con el cultivo, producción, fabricación, importación, exportación, almacenamiento, transporte, comercialización, distribución, uso y posesión de semillas, cannabis y sus derivados con fines medicinales y científicos. De esta manera, constituye una de las principales bases jurídicas para el desarrollo de la cadena productiva regulada del cannabis en Colombia (Congreso de la República de Colombia, 2016) .

Posteriormente, este marco fue desarrollado mediante diferentes disposiciones reglamentarias que establecieron las condiciones para las actividades relacionadas con el cannabis:

- **Decreto 613 de 2017**: **Decreto 613 de 2017**: reglamenta la Ley 1787 de 2016 y establece disposiciones relacionadas con el acceso seguro e informado al uso médico y científico del cannabis. Asimismo, regula aspectos asociados al sistema de licenciamiento y a las actividades de cultivo, producción, fabricación, almacenamiento, transporte, comercialización y distribución (Congreso de la República de Colombia, 2017) .
- **Decreto 822 de 2018**: modificó y adicionó disposiciones relacionadas con las licencias para el uso de semillas para siembra, cultivo de plantas de cannabis y fabricación de derivados, dentro del marco regulatorio establecido para el sector.
- **Decreto 811 de 2021**: sustituyó el título relacionado con el acceso seguro e informado al uso del cannabis y de la planta de cannabis, actualizando las condiciones de evaluación, seguimiento y control de las actividades de importación, exportación, cultivo, producción, fabricación, almacenamiento, transporte, comercialización, distribución, disposición final y uso. Además, incorporó disposiciones aplicables a materiales y derivados no psicoactivos destinados a fines industriales, hortícolas y alimenticios (Congreso de la República de Colombia, 2021) .
- **Decreto 1138 de 2025**: modifica parcialmente el régimen establecido en el Decreto 780 de 2016 en relación con el acceso seguro e informado al uso del cannabis y de la planta de cannabis, constituyendo una actualización reciente del marco regulatorio colombiano (Decreto 1138, 2025 (Congreso de la República de Colombia, 2025) .

Estas disposiciones permiten establecer las condiciones jurídicas bajo las cuales se desarrollan las diferentes actividades de la cadena de suministro del Cannabis sativa. Su importancia para la presente investigación radica en que las etapas de cultivo, cosecha, transformación y fabricación de derivados constituyen fuentes de generación de biomasa residual que posteriormente puede ser gestionada, aprovechada o valorizada. Además, el Decreto 811 de 2021 establece expresamente que la disposición final y la destrucción de materiales deben realizarse de acuerdo con las normas ambientales aplicables, aspecto directamente relacionado con el objeto de estudio de esta investigación (Congreso de la República de Colombia, 2021) .

En materia ambiental, las actividades relacionadas con el cannabis también deben observar las disposiciones generales aplicables a la gestión de residuos. En este contexto, el Decreto 1076 de

2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, constituye un referente general para las obligaciones ambientales asociadas a las actividades productivas. Su consideración dentro de esta investigación permite relacionar la regulación específica del cannabis con las disposiciones ambientales que determinan las condiciones para el manejo de los residuos según sus características y nivel de riesgo (Congreso de la República de Colombia, 2015) .

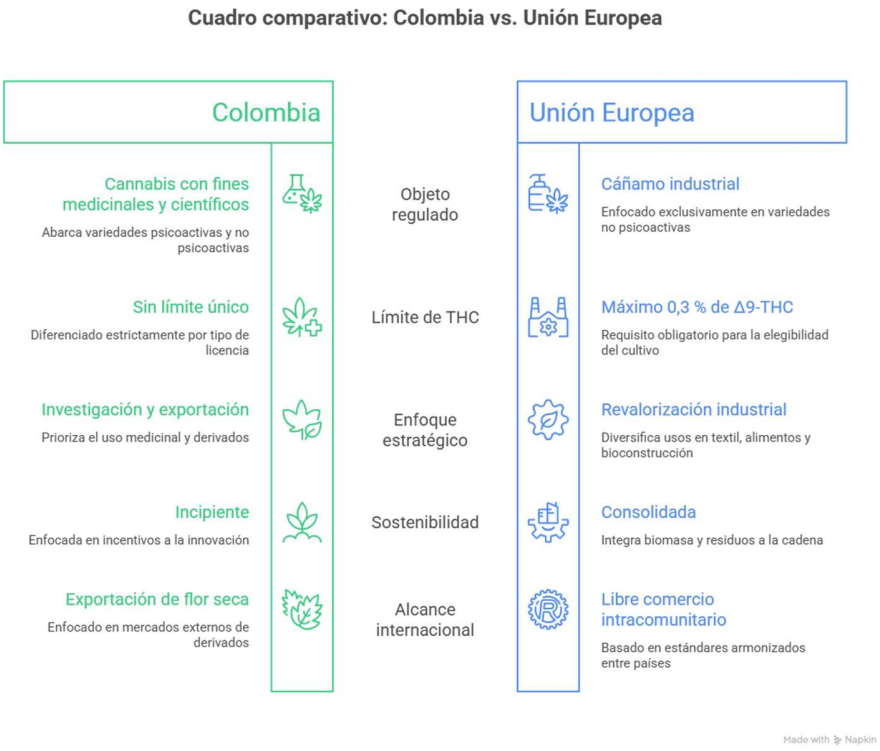
En consecuencia, el marco legal colombiano establece una relación entre la regulación específica del Cannabis sativa y las disposiciones generales de protección ambiental. Mientras las normas sectoriales determinan las condiciones para el cultivo, transformación, producción y comercialización del cannabis y sus derivados, la normativa ambiental establece los principios y obligaciones relacionados con el manejo de los residuos generados durante estas actividades. Esta articulación resulta fundamental para analizar la viabilidad de las alternativas de valorización identificadas en la presente investigación desde un enfoque de economía circular.

Como referente internacional, la Unión Europea ha desarrollado disposiciones específicas para el cultivo de cáñamo industrial dentro de su Política Agrícola Común. Entre sus principales elementos se encuentran el uso de variedades que cumplen las condiciones establecidas por la normativa europea y un límite máximo de 0,3 % de Δ9-THC para determinadas condiciones de elegibilidad dentro de la política agrícola (Comisión Europea, 2022)

Este referente internacional permite establecer una comparación con el contexto colombiano, debido a que la regulación europea diferencia de manera más explícita el cáñamo destinado a usos industriales de otros usos del cannabis. Para esta investigación, esta comparación permite identificar diferencias en los enfoques regulatorios y reconocer la importancia de aspectos como la trazabilidad, el control de la materia prima y el aprovechamiento de la biomasa dentro de cadenas productivas orientadas hacia la sostenibilidad.

De manera general, el marco legal analizado permite establecer que la gestión de residuos de Cannabis sativa no depende exclusivamente de las normas que regulan el cultivo y la transformación de la planta. Por el contrario, debe comprenderse a partir de la articulación entre la Constitución Política, la legislación ambiental y la regulación específica del cannabis. Esta relación constituye el fundamento jurídico para analizar las alternativas de gestión y valorización de los residuos identificados en la cadena de suministro, considerando tanto su potencial de aprovechamiento como las condiciones legales aplicables a su manejo y disposición final.

Figura 1. Cuadro comparativo: Colombia vs Unión Europea



Nota. Elaboración propia.

5.5 Marco Geográfico

La producción de *Cannabis sativa* en Colombia se desarrolla en un territorio caracterizado por una elevada diversidad climática, topográfica y productiva. Esta condición geográfica adquiere especial importancia para el análisis de la gestión de residuos, debido a que la biomasa residual no se genera de manera homogénea ni se encuentra concentrada en un único territorio. Por el contrario, las características de los sistemas productivos, la escala de los cultivos, las condiciones agroclimáticas y la localización de las instalaciones de transformación determinan la cantidad, composición y disponibilidad espacial de los residuos generados a lo largo de la cadena de suministro. La literatura sobre cannabis medicinal en Colombia ha señalado que el desarrollo de esta actividad se encuentra condicionado por las características particulares del territorio y por las condiciones productivas de los cultivadores. (Anderson et al., s/f)

En Colombia, la regulación de la actividad productiva contempla modalidades diferenciadas para el cultivo de cannabis psicoactivo y no psicoactivo, así como para la producción de semillas y

la fabricación de derivados. Esta estructura regulatoria ha permitido la consolidación progresiva de una cadena productiva formal que comprende actividades agrícolas, transformación, investigación y comercialización. La distribución territorial de los cultivos, por tanto, debe analizarse considerando no solamente la existencia de condiciones agroecológicas favorables, sino también la localización de productores, licenciatarios, centros de transformación e infraestructura asociada a la cadena productiva. El Ministerio de Justicia y del Derecho mantiene registros diferenciados de los licenciatarios y de los pequeños y medianos cultivadores, productores y comercializadores nacionales.

5.5.1 Distribución territorial de la producción

La actividad productiva del cannabis presenta una distribución territorial asociada principalmente con diferentes zonas de la región Andina y otras áreas del país que reúnen condiciones adecuadas para el establecimiento de cultivos. Entre los departamentos que han adquirido relevancia dentro de la cadena productiva se encuentran Cauca, Antioquia, Tolima, Boyacá y Cundinamarca. La importancia de estos territorios no responde exclusivamente a la disponibilidad de tierras, sino también a factores como altitud, temperatura, radiación solar, disponibilidad hídrica, infraestructura, conectividad y condiciones socioeconómicas para el desarrollo de actividades agrícolas y de transformación.

La diversidad territorial colombiana permite establecer sistemas productivos bajo diferentes condiciones ambientales. Estudios agronómicos realizados en el país han demostrado que *Cannabis sativa* puede presentar diferencias en crecimiento, producción de biomasa y concentración de fitocannabinoides de acuerdo con las condiciones de cultivo y el material vegetal empleado. Estas diferencias son relevantes para la gestión de residuos porque la cantidad y composición de la biomasa generada pueden variar entre sistemas productivos y condiciones ambientales.(Araméndiz-Tatis et al., 2023)

Cauca. El departamento presenta una importante diversidad geográfica y altitudinal, con predominio de territorios montañosos y una amplia variedad de condiciones agroecológicas. Dentro del proceso de consolidación de la industria regulada del cannabis, el departamento ha contado con participación de pequeños y medianos cultivadores y esquemas asociativos. La presencia de unidades productivas de diferente escala resulta relevante desde la perspectiva de la gestión de residuos, debido a que puede generar flujos de biomasa distribuidos entre diferentes predios y municipios. Esta característica puede dificultar la consolidación de cantidades suficientes de residuos para procesos de transformación industrial centralizados. La literatura sobre la industria colombiana ha identificado que las condiciones territoriales y las capacidades diferenciadas de los productores constituyen elementos que inciden en la incorporación de estos actores a las cadenas formales del cannabis. (Anderson et al., s/f)

Antioquia. Antioquia se caracteriza por una elevada diversidad topográfica y climática, determinada por su ubicación en la región Andina y la presencia de diferentes pisos térmicos. Estas condiciones permiten el desarrollo de actividades agrícolas bajo distintos sistemas productivos y hacen del departamento un territorio relevante dentro de la producción nacional de cannabis. Desde la perspectiva de la cadena de suministro, la diversidad territorial implica que la localización de los cultivos debe relacionarse con la disponibilidad de infraestructura para almacenamiento, transformación y transporte. La investigación desarrollada sobre el contexto colombiano señala que la consolidación del sector depende, entre otros aspectos, de las capacidades productivas y de la articulación entre los diferentes actores de la cadena.

Tolima. El departamento presenta una combinación de zonas montañosas y valles interandinos que generan diferentes condiciones térmicas y de disponibilidad de recursos para la producción agrícola. Su participación en la actividad cannábica debe analizarse en relación con la localización de los cultivos y la infraestructura disponible para las actividades posteriores a la cosecha. Esta configuración territorial puede producir diferencias en los costos de recolección y transporte de la biomasa residual, especialmente cuando los puntos de generación se encuentran alejados de las instalaciones donde se realiza su transformación o valorización.

Boyacá. Boyacá constituye un territorio de particular interés para esta investigación debido a la presencia documentada de biomasa residual de *Cannabis sativa* utilizada como materia prima para procesos de valorización. Un estudio reciente empleó tallos y ramas residuales procedentes de Sotaquirá, Boyacá, como fuente de celulosa para la obtención de materiales de base biológica. El material vegetal fue recolectado a aproximadamente 2.860 m s. n. m. y sometido posteriormente a procesos de secado, molienda y tratamiento químico. Este antecedente demuestra que la generación de residuos de cannabis en Colombia no constituye únicamente una posibilidad teórica, sino que existen experiencias científicas en las que biomasa residual generada en territorios específicos del país ha sido incorporada a procesos de valorización. (Lara et al., 2025)

Cundinamarca. La localización de Cundinamarca alrededor del principal centro urbano y económico del país constituye un factor relevante para la configuración de la cadena de suministro. La disponibilidad de infraestructura vial, servicios especializados, instituciones de investigación y mercados asociados a Bogotá puede favorecer la conexión entre los productores y las actividades de transformación. Sin embargo, la existencia de infraestructura regional no elimina las dificultades asociadas con la dispersión de los cultivos en zonas rurales. Por esta razón, la distancia entre los puntos de generación de residuos y los centros de transformación continúa siendo una variable que debe incorporarse en el análisis de las alternativas de valorización.

En conjunto, estos departamentos muestran que la producción de *Cannabis sativa* en Colombia se desarrolla bajo condiciones territoriales heterogéneas. Esta heterogeneidad tiene consecuencias directas sobre la gestión de residuos, debido a que una misma alternativa de aprovechamiento puede presentar diferentes niveles de factibilidad dependiendo de la ubicación del residuo, la escala del productor, la cantidad disponible y la distancia hasta el centro de transformación.

5.5.2 Licenciamiento y distribución de pequeños y medianos productores

La evolución del sector regulado puede observarse mediante el comportamiento de las licencias y de los registros de pequeños y medianos cultivadores. En este punto es necesario diferenciar las cifras correspondientes a distintos años y universos institucionales para evitar comparaciones directas entre registros que no utilizan exactamente los mismos criterios.

Para 2026, el Ministerio de Justicia y del Derecho mantiene un listado oficial de pequeños y medianos cultivadores, productores y comercializadores nacionales de cannabis. La Resolución 0310 del 24 de febrero de 2026 establece la publicación de este listado y señala que el Ministerio es la autoridad competente para expedir y realizar el seguimiento de las licencias de cultivo de cannabis psicoactivo y no psicoactivo. El documento relaciona licenciatarios ubicados, entre otros departamentos, en Antioquia y Cundinamarca, evidenciando la presencia territorial de pequeños y medianos actores dentro del sistema regulado. (Ministerio De Justicia y del Derecho, 2026)

Esta información resulta especialmente relevante para el análisis de residuos porque la existencia de pequeños y medianos productores implica una posible fragmentación de los puntos de generación de biomasa. Mientras una instalación industrial puede concentrar cantidades significativas de residuos en un único lugar, los pequeños productores pueden generar cantidades menores distribuidas geográficamente. En consecuencia, la gestión de estos materiales requiere considerar mecanismos de recolección, consolidación y transporte que permitan alcanzar escalas suficientes para su posterior aprovechamiento.

5.5.3 Implicaciones geográficas y logísticas para la gestión de residuos

La distribución espacial de los cultivos tiene una relación directa con la logística de los residuos generados en la cadena de suministro. La biomasa residual producida durante el cultivo, cosecha y poscosecha puede presentar una elevada dispersión territorial, mientras que los residuos generados durante procesos de extracción y transformación tienden a concentrarse en instalaciones industriales. Esta diferencia modifica las condiciones necesarias para su recolección, almacenamiento, transporte y valorización.

Los estudios de valorización de biomasa desarrollados en Colombia muestran que la ubicación de los centros de transformación puede estar estrechamente relacionada con la distancia respecto de los puntos de generación de materia prima. La localización próxima a los centros de recolección puede reducir impactos ambientales y requerimientos asociados con el transporte, lo que demuestra que la distribución espacial de la biomasa debe incorporarse desde las etapas iniciales del diseño de una cadena de valorización. (Piedrahita-Rodríguez et al., 2023)

Esta consideración resulta particularmente importante para *Cannabis sativa*, debido a que las alternativas de valorización identificadas en la literatura presentan diferentes requerimientos de procesamiento. Los residuos lignocelulósicos, por ejemplo, pueden dirigirse hacia procesos de producción de fibras, materiales compuestos, celulosa, biochar o energía, mientras que otras fracciones pueden requerir procesos de extracción o transformación química más especializados. La selección de la alternativa no depende únicamente de la composición del residuo, sino también de la posibilidad de movilizarlo de manera técnica y económicamente viable hasta el lugar donde se encuentra disponible la tecnología necesaria. La literatura reciente sobre residuos de cannabis confirma el potencial de estas corrientes como materias primas para la obtención de productos de mayor valor agregado. (Pérez Aguilar et al., 2023)

Desde el enfoque de economía circular, esta dimensión territorial permite establecer que la gestión de residuos de Cannabis sativa no debe abordarse exclusivamente desde la perspectiva del tratamiento del residuo, sino desde la configuración completa del flujo de materiales. La localización del cultivo determina el punto de generación; la escala productiva condiciona la cantidad disponible; la distancia determina parte de los requerimientos logísticos; y la ubicación de las instalaciones de transformación condiciona las alternativas tecnológicas que pueden implementarse.

Por lo tanto, para la presente investigación la dimensión geográfica constituye una variable transversal que debe incorporarse al análisis de las rutas de valorización. Una alternativa puede presentar un elevado potencial técnico para transformar un determinado residuo, pero su viabilidad económica y ambiental puede reducirse cuando la biomasa se encuentra altamente dispersa y requiere recorridos extensos para su consolidación. En contraste, cuando existe una concentración suficiente de biomasa próxima a una infraestructura de transformación, pueden generarse condiciones más favorables para implementar procesos de mayor escala.

La selección de Cauca, Antioquia, Tolima, Boyacá y Cundinamarca no responde exclusivamente al número de licencias registradas, sino a su utilidad para representar diferentes contextos territoriales en los que se desarrolla la cadena productiva del Cannabis sativa en Colombia. Estos departamentos presentan presencia documentada de actividades asociadas al cultivo y procesamiento del cannabis y permiten incorporar condiciones diferenciadas de localización,

concentración de actividades productivas, disponibilidad de infraestructura y conectividad. La información disponible evidencia, además, que la actividad cannábica presenta una distribución territorial amplia y no se concentra en un único departamento, por lo que el análisis de su gestión de residuos requiere considerar escenarios espaciales diversos. (Policia Nacional, 2025; Sánchez, 2021)

En consecuencia, el análisis territorial de Cauca, Antioquia, Tolima, Boyacá y Cundinamarca se plantea como una selección de referencia para examinar cómo las condiciones geográficas y logísticas pueden incidir en la gestión de los residuos generados en la cadena de suministro. Esta selección no pretende establecer un orden de importancia entre departamentos ni corresponde exclusivamente a los territorios con mayor número de licencias, sino aportar una representación de contextos productivos diferenciados. De esta manera, la localización de los puntos de generación, la infraestructura disponible y las distancias de transporte pueden incorporarse posteriormente al análisis de las alternativas de valorización, reconociendo que la selección de una ruta circular depende tanto de sus características tecnológicas como de su correspondencia con las condiciones espaciales de la cadena de suministro.

La distribución territorial de las actividades relacionadas con el cultivo de *Cannabis sativa* en Colombia evidencia una presencia diferenciada entre los departamentos del país. Esta distribución puede aproximarse mediante el registro de licencias otorgadas para actividades asociadas al cultivo de cannabis psicoactivo, no psicoactivo y al manejo de semillas, constituyendo un indicador de la localización de la actividad productiva regulada. De acuerdo con los registros del Ministerio de Justicia y del Derecho, se observa una concentración de licencias en departamentos como Antioquia, Cundinamarca, Valle del Cauca, Santander, Boyacá y Tolima, entre otros. Esta distribución territorial resulta relevante para el análisis de la gestión de residuos, debido a que la concentración de actividades productivas y de transformación puede estar asociada con una mayor generación de biomasa residual y, por tanto, con oportunidades diferenciadas para su aprovechamiento bajo un enfoque de economía circular.

Tabla 1. Distribución territorial de las actividades relacionadas con el cultivo de *Cannabis sativa* en Colombia.

Etiquetas de fila	Suma de NO PSICO	Suma de PSICO	Suma de SEMILL	Suma de TOTAL
ANTIOQUIA,	157	137	27	321
ARAUCA,	1	0	0	1
ATLÁNTICO,	20	11	2	33
BOGOTÁ, D.C.,	14	11	4	29
BOLÍVAR,	4	2	0	6
BOYACÁ,	43	36	9	88
CALDAS,	19	11	0	30
CAQUETÁ,	3	1	0	4
CASANARE,	13	6	1	20
CAUCA,	20	18	7	45
CESAR,	7	6	1	14
CHOCÓ,	1	0	0	1
CÓRDOBA,	13	6	0	19
CUNDINAMARCA,	137	107	26	270
GUAVIARE,	1	0	0	1
HUILA,	17	11	3	31
LA GUAJIRA,	1	2	0	3
MAGDALENA,	20	23	6	49
META,	37	25	3	65
NARIÑO,	9	4	1	14
NORTE DE SANTANDER,	8	6	0	14
PUTUMAYO,	1	0	0	1
QUINDÍO,	12	5	1	18
RISARALDA,	14	8	2	24
SANTANDER,	50	26	7	83
SUCRE,	3	5	0	8
TOLIMA,	37	32	6	75
VALLE DEL CAUCA,	59	42	8	109
VICHADA,	1	0	0	1
Total general	**722**	**541**	**114**	**1377**

Nota. Elaboración propia a partir de datos del Ministerio de Justicia y del Derecho (Subdirección de Control y Fiscalización de Sustancias Químicas y Estupefacientes, corte anterior a 2025.

6. Diseño Metodológico

El desarrollo de esta monografía se fundamenta en un diseño investigativo en un enfoque mixto (cualitativo y cuantitativo), sustentado en una revisión sistemática de la literatura. Desde la perspectiva cualitativa, se realizó un análisis documental de la evidencia científica relacionada con la gestión de residuos en la cadena de suministro de Cannabis sativa, con el fin de comprender los procesos de generación, aprovechamiento y valorización de la biomasa residual bajo un enfoque de economía circular. La identificación, selección y evaluación de los estudios se desarrolló siguiendo la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses).

Desde el componente cuantitativo, se efectuó un análisis bibliométrico de la producción científica mediante el software VOSviewer, con el cual se construyeron redes de coocurrencia de palabras clave, identificando las principales tendencias de investigación, áreas temáticas, vacíos de conocimiento y evolución del campo de estudio.

6.1 Supuestos de trabajo:

(i) La literatura científica reciente documenta alternativas de valorización de residuos de Cannabis sativa con suficiente evidencia experimental para ser comparadas entre sí;
(ii) Las alternativas reportadas difieren sistemáticamente en madurez tecnológica, requerimientos de procesamiento y valor agregado, lo que permite jerarquizarlas;
(iii) La producción científica sobre tecnologías de Industria 4.0 aplicadas específicamente a residuos de cannabis es escasa frente a la del sector agroalimentario general

6.2 Tipo de Estudio

Tipo de estudio

La investigación se desarrolla bajo un diseño no experimental, debido a que no se manipulan deliberadamente variables ni se interviene sobre las condiciones en las que se generan los fenómenos estudiados. En este tipo de diseño, el investigador analiza los fenómenos a partir de la información disponible, sin establecer condiciones experimentales para modificar su comportamiento. La selección del diseño constituye un elemento fundamental para definir la forma en que se obtiene y analiza la información de acuerdo con la pregunta de investigación (Rey-Rubiano, 2024) .

En concordancia con lo anterior, el estudio corresponde a una revisión bibliográfica sistemática, orientada a identificar, organizar y analizar la evidencia disponible sobre los residuos generados a lo largo de la cadena de suministro de Cannabis sativa, sus alternativas de valorización bajo el enfoque de economía circular y las posibilidades de incorporación de tecnologías de la Industria 4.0. Para ello, se emplearon criterios definidos de búsqueda, selección y análisis de literatura científica y técnica, de acuerdo con el procedimiento metodológico establecido en la investigación.

Por tanto, el carácter no experimental se relaciona con la naturaleza documental del estudio: no se realizan ensayos de laboratorio, mediciones directas ni intervenciones sobre los residuos, sino que se analizan resultados y conocimientos previamente documentados para establecer relaciones entre las características de los residuos, las alternativas de valorización y las condiciones técnicas, ambientales, económicas y logísticas de su posible aprovechamiento.

6.3 Documentación del corpus bibliográfico

6.3 Documentación del corpus bibliográfico

Con el fin de documentar de manera transparente y reproducible el proceso de identificación del corpus bibliográfico, se realizaron seis búsquedas en la base de datos Scopus, utilizando diferentes combinaciones de términos relacionadas con Cannabis sativa, residuos, industria, economía circular y tecnologías de la Industria 4.0. Las estrategias se diseñaron de manera progresiva, partiendo de una búsqueda general sobre Cannabis sativa y posteriormente incorporando términos asociados con residuos, contexto industrial y economía circular. Finalmente, se realizaron dos búsquedas orientadas a identificar la relación entre los residuos de *Cannabis sativa* y las tecnologías de la Industria 4.0, así como la presencia de estas tecnologías en cadenas de suministro agroalimentarias.

Como criterio de filtrado, se utilizó principalmente el tipo de documento “Artículo”, mientras que la búsqueda específica sobre Cannabis sativa y tecnologías de la Industria 4.0 se realizó sin filtros adicionales. La búsqueda comparativa sobre cadenas agroalimentarias y tecnologías de la Industria 4.0 se efectuó igualmente con el filtro de tipo de documento “Artículo”. Todas las consultas fueron realizadas el 16 de septiembre de 2026 y permitieron identificar un total de 9.712 registros entre las seis estrategias de búsqueda. Las ecuaciones empleadas, los filtros aplicados y el número de registros recuperados se presentan en la Tabla 2.

Las cuatro ecuaciones no son independientes entre sí: la primera ("Cannabis Sativa") contiene a las tres restantes, puesto que todas incluyen dicho término. Por esta razón, el número de registros

identificados no corresponde a la suma aritmética de los resultados (8.545 + 294 + 607 + 41), sino al conjunto de registros únicos obtenido tras consolidar las exportaciones y eliminar las coincidencias, que asciende a 8.545 registros, cifra que se reporta en el diagrama de flujo PRISMA (apartado 6.5). Cabe señalar que las ecuaciones de búsqueda no incorporaron un filtro de rango de años; la ventana temporal 2000-2026 definida en los criterios de inclusión y exclusión (apartado 6.4) se aplicó como criterio de cribado por título y resumen, y no como parámetro de la consulta inicial en Scopus.

Adicionalmente, con el propósito de examinar la articulación entre la gestión de residuos de Cannabis sativa y las tecnologías de Industria 4.0, se ejecutaron dos ecuaciones de búsqueda complementarias. La primera combinó los términos ("cannabis sativa" OR "industrial hemp") AND (waste OR residue OR biomass) AND ("industry 4.0" OR IoT OR "internet of things" OR blockchain OR traceability OR "digital twin"), sin filtros adicionales dado el bajo volumen de resultados esperado. La segunda combinó los términos ("agri-food" OR agroindustr* OR "agricultural supply chain") AND (waste OR residue) AND ("industry 4.0" OR IoT OR "internet of things" OR blockchain OR traceability OR "digital twin"), con filtro de tipo de documento (artículo). Estas dos búsquedas no forman parte del corpus de identificación del proceso PRISMA; su resultado se emplea exclusivamente como evidencia comparativa para el análisis del vacío tecnológico presentado en el apartado 7.2.

La Tabla 2 presenta la base de datos consultada, la ecuación de búsqueda empleada, los filtros aplicados, la fecha de consulta y el número de registros obtenidos para cada una de las búsquedas descritas.

Tabla 2. Resultados de búsqueda en Scopus.

Base de datos	Ecuación de búsqueda	Filtros	Fecha de consulta	Registros
Scopus	"Cannabis Sativa"	Tipo de documento (Artículo)	16/09/2026	8545
Scopus	"Cannabis Sativa " AND "Waste"	Tipo de documento (Artículo)	16/09/2026	294
Scopus	"Cannabis Sativa " AND "Industry"	Tipo de documento (Artículo)	16/09/2026	607
Scopus	"cannabis sativa" AND "economy"	Tipo de documento (Artículo)	16/09/2026	91
Scopus	"Cannabis Sativa " AND "Circular economy"	Tipo de documento (Artículo)	16/09/2026	41
Scopus	("cannabis sativa" OR "industrial hemp") AND (waste OR residue OR biomass) AND ("industry 4.0" OR IoT OR "internet of things" OR blockchain OR traceability OR "digital twin")	Sin filtro	16/09/2026	3
Scopus	("agri-food" OR agroindustr* OR "agricultural supply chain") AND (waste OR residue) AND ("industry 4.0" OR IoT OR "internet of things" OR blockchain OR traceability OR "digital twin")	Tipo de documento (Artículo)	16/09/2026	222

Nota. Elaboración propia a partir de Scopus.

6.4 Criterios de inclusión y exclusión

Con el propósito de delimitar de forma explícita y reproducible el corpus analizado, se definieron los siguientes criterios de inclusión y exclusión, aplicados sobre los registros obtenidos en las búsquedas reportadas en la tabla anterior.

Criterios de inclusión

- Artículos revisados por pares (peer-reviewed), publicados en revistas indexadas.
- Estudios con evidencia experimental original o revisiones sistemáticas/bibliométricas sobre el tema.

- Investigaciones centradas en residuos, subproductos o biomasa residual de Cannabis sativa o cáñamo industrial (hemp).
- Publicaciones en inglés o español dentro de la ventana temporal 2000-2026 definida para la revisión.
- Estudios que aborden alguna alternativa de valorización o aprovechamiento de dichos residuos (bioenergía, biomateriales, compostaje, extracción de compuestos, entre otros) o su relación con el enfoque de economía circular.

Criterios de exclusión

- Estudios exclusivamente clínicos o farmacológicos sobre el uso terapéutico del cannabis, sin relación con residuos o subproductos.
- Literatura gris sin respaldo institucional (blogs, notas de prensa, documentos no revisados por pares).
- Registros duplicados entre bases de datos o entre las distintas ecuaciones de búsqueda empleadas.
- Textos sin acceso al documento completo (solo resumen disponible).
- Estudios centrados únicamente en aspectos regulatorios, legales o de mercado, sin datos técnicos sobre residuos o su valorización.

6.5 Diagrama de flujo PRISMA

Con el fin de garantizar la rigurosidad, transparencia y reproducibilidad del diseño metodológico, la selección y depuración del corpus bibliográfico se llevó a cabo bajo los lineamientos de la declaración PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Este procedimiento equivale a la definición del marco poblacional y muestral en investigaciones empíricas, asegurando la trazabilidad de los criterios aplicados desde la identificación inicial hasta la inclusión final de los estudios.

Cabe precisar que la cifra final de 41 estudios elegibles coincide cuantitativamente con el volumen obtenido al aplicar la sub-ecuación temática de mayor especificidad "Cannabis sativa" AND "Circular economy". Esta coincidencia responde al alto grado de convergencia metodológica del proceso de cribado, donde los criterios de inclusión/exclusión aplicados al total general de 8.545 registros depuraron progresivamente la literatura marginal o no atinente, identificando exactamente el conjunto de investigaciones centradas en la intersección directa entre economía circular y la cadena de valor de Cannabis sativa.

Tabla 3. Desglose cuantitativo de cada fase del proceso de selección.

Fase PRISMA	Criterio / Etapa de evaluación	Cantidad de registros	Razón de exclusión / Descripción
Identificación	Registros identificados en Scopus mediante ecuaciones de búsqueda	**9.487**	Búsqueda inicial según la estrategia documentada en la Tabla de corpus bibliográfico.
	Registros eliminados por duplicación	**942**	Coincidencias entre las distintas ecuaciones de búsqueda aplicadas.
Cribado	Registros cribados por título y resumen	**8.545**	Evaluación preliminar de relevancia temática.
	Registros excluidos en el cribado	**8.367**	Estudios orientados exclusivamente a clínica/farmacología, normativas sin datos técnicos, o publicaciones fuera de la ventana 2000-2025.
Elegibilidad	Documentos evaluados a texto completo	**178**	Análisis detallado para verificación de criterios de inclusión.
	Documentos excluidos a texto completo	**137**	Artículos sin acceso a texto completo, literatura gris sin revisión por pares, y estudios sin evidencia sobre caracterización/valorización de biomasa.
Inclusión	**Estudios finalmente incluidos en la síntesis**	**41**	**Corpus definitivo para el análisis bibliométrico y la caracterización de alternativas.**

Nota. Elaboración propia basada en la declaración PRISMA 2020. Las cuatro ecuaciones de búsqueda no son mutuamente independientes, pues la Ecuación 1 (*Cannabis sativa*) abarca sintácticamente a las restantes. Por esta razón, tras consolidar los archivos y remover los duplicados (942 registros), el universo de cribado por título y resumen quedó fijado en **8.545 registros únicos**. Asimismo, la ventana temporal (2000-2026) establecida en los criterios de

inclusión (Sección 6.4) se aplicó como criterio de filtrado en la etapa de cribado y no como parámetro inicial en Scopus.

6.6 Configuración y parámetros del análisis bibliométrico en VOSviewer

El análisis bibliométrico de coocurrencia de palabras clave se llevó a cabo utilizando el software VOSviewer (versión 1.6.20), tomando como insumo exclusivo los registros bibliográficos exportados desde Scopus correspondientes a los 41 estudios finalmente incluidos en la síntesis. Este procedimiento garantizó la delimitación del mapa conceptual a la cadena de suministro, la gestión de residuos y la economía circular en Cannabis sativa, excluyendo términos de carácter clínico, farmacológico o animal (tales como mouse, animal experiment o nabilone) inherentes a las publicaciones descartadas en las fases de cribado y elegibilidad.

La consulta bibliométrica se estructuró seleccionando todas las palabras clave (All keywords: combinación de palabras clave del autor e Index Keywords de Scopus) bajo el método de conteo completo (Full counting). Para la construcción y visualización de la red, se estableció un umbral mínimo de 5 ocurrencias por término, logrando filtrar el ruido léxico y seleccionar únicamente los conceptos de mayor consistencia e impacto temático dentro del corpus.

La matriz de coocurrencia generada fue normalizada aplicando el método de fuerza de asociación (Association strength). A partir de la estructura de conexiones y densidades, la herramienta identificó los principales nodos conceptuales y sus interacciones, agrupándolos en clústeres temáticos diferenciados que reflejan las líneas dominantes de investigación en torno a la valorización de biomasa y el aprovechamiento de subproductos en la agroindustria del cannabis.

6.7 Variables e indicadores de análisis

De acuerdo con el enfoque de revisión sistemática, el análisis se organizó en tres variables, una por cada objetivo específico. La primera corresponde al tipo de residuo generado, descrito por la etapa de la cadena de suministro en que se origina, la fracción de la planta y su composición lignocelulósica reportada; su indicador es la frecuencia con que cada tipo de residuo es abordado en los estudios del corpus. La segunda corresponde a la alternativa de valorización, evaluada mediante seis indicadores cualitativos convertidos a una escala de 1 a 5: madurez tecnológica, acondicionamiento requerido, intensidad energética, valor agregado, escala mínima viable y mercado en Colombia, cuya integración produce un puntaje multicriterio que permite jerarquizar las rutas. La tercera corresponde al grado de integración de tecnologías de Industria 4.0 en la gestión de residuos, cuyos indicadores son el número de registros recuperados por las ecuaciones complementarias, la presencia de términos de Industria 4.0 en las redes de coocurrencia y el número de casos documentados por tipo de tecnología y eslabón de la cadena.

7. Resultados y Discusión

7.1 Tipología de residuos por etapa

La cadena de valor de *Cannabis sativa* comprende diferentes etapas que abarcan desde la selección y propagación del material vegetal hasta el cultivo, la cosecha y poscosecha, el procesamiento, la manufactura de productos, su almacenamiento y distribución y, finalmente, el consumo y la gestión de los residuos generados. Cada una de estas etapas presenta características particulares en cuanto a las actividades desarrolladas y, por consiguiente, a los tipos de residuos y subproductos que pueden generarse. La literatura señala que una proporción importante de los residuos de la industria del cannabis corresponde a biomasa vegetal, especialmente durante las etapas de cultivo y procesamiento, aunque también se identifican corrientes asociadas con solventes, materiales de empaque y productos no utilizados (Robertson et al., 2023)

Desde una perspectiva de economía circular, la identificación de estas corrientes resulta necesaria para determinar cuáles pueden reincorporarse a nuevos procesos productivos y cuáles requieren tratamientos específicos antes de su aprovechamiento o disposición. La literatura sobre cáñamo industrial evidencia que tallos, hojas, inflorescencias, semillas y otras fracciones de la planta presentan características que permiten su utilización como recursos secundarios para la obtención de fibras, materiales lignocelulósicos, bioproductos, energía y otros productos de mayor valor agregado (Pieracci et al., 2025) (Enarevba & Haapala, 2024) Así mismo, diferentes estudios demostraron la posibilidad de valorizar residuos específicos, como tallos y cañamiza, mediante procesos de transformación física, química, biológica y termoquímica(Hancock et al., 2023) (Marrot et al., 2022) (Moscariello et al., 2022)

Tabla 4. Residuos y subproductos generados en las principales etapas de la cadena de valor de Cannabis sativa.

Etapa de la cadena de valor	Principales actividades	Residuos y subproductos identificados	Características y consideraciones para su gestión
1. Selección genética y propagación	Selección de variedades, multiplicación del material vegetal, producción y establecimiento de plántulas.	Plántulas no viables, material vegetal descartado, restos de propagación y sustratos utilizados.	Corresponden principalmente a biomasa vegetal y materiales asociados al establecimiento del cultivo. Su manejo puede orientarse hacia compostaje, recuperación de materia orgánica o aprovechamiento biológico, siempre que las condiciones regulatorias y sanitarias lo permitan (Enarevba & Haapala, 2024; Robertson et al., 2023).
2. Cultivo	Siembra, establecimiento, fertirriego, manejo agronómico, poda y control fitosanitario.	Tallos, hojas, raíces, plantas descartadas, restos de poda y medios de cultivo o sustratos agotados.	Es una de las etapas con mayor generación de biomasa residual. Los tallos, hojas y raíces presentan características lignocelulósicas y pueden ser destinados a procesos de valorización material, energética o biológica. Los sustratos constituyen además una corriente relevante de residuos en determinados sistemas productivos (Robertson et al., 2023; Enarevba & Haapala, 2024).
3. Cosecha y poscosecha	Corte, separación de partes de la planta, secado, curado, clasificación y acondicionamiento.	Tallos, hojas, raíces, flores o inflorescencias fuera de especificación y fracciones vegetales no comercializables.	La separación de las partes de la planta genera corrientes con diferente composición y potencial de valorización. Las hojas e inflorescencias pueden dirigirse a procesos de extracción o valorización biológica, mientras que los tallos pueden aprovecharse como fuente de fibras y materiales lignocelulósicos (Enarevba & Haapala, 2024; Pieracci et al., 2025).
4. Procesamiento y transformación	Desfibrado, trituración, molienda, extracción de compuestos, separación de fracciones y transformación de biomasa.	Cañamiza o *hurds* , fibras cortas, fracciones lignocelulósicas, biomasa residual posterior a la extracción y residuos asociados al proceso.	Esta etapa concentra residuos con potencial de valorización mediante rutas materiales, biológicas y termoquímicas. Los *hurds* , hojas e inflorescencias han sido estudiados como biomasa para bioenergía y bioproductos, mientras que los tallos pueden transformarse en materiales carbonosos y nanomateriales de celulosa (Moscariello et al., 2022; Marrot et al., 2022; Hancock et al., 2023).
5. Manufactura, formulación y empaque	Formulación de productos, elaboración de materiales, acondicionamiento y envasado.	Restos de formulación, producto fuera de especificación, materiales plásticos, cartón, papel, envases y elementos de embalaje descartados.	Las corrientes generadas pueden presentar características diferentes dependiendo del producto fabricado. En particular, los residuos de empaque requieren separación según su composición para favorecer su reciclaje o aprovechamiento. La literatura sobre la industria del cáñamo identifica aplicaciones de fibras y *hurds* en productos de empaque, mientras que los estudios sobre gestión de residuos de cannabis reconocen los materiales de empaque y productos no utilizados como corrientes de residuos (Enarevba & Haapala, 2024; Robertson et al., 2023).
6. Almacenamiento, logística y distribución	Almacenamiento de productos, transporte, preparación de pedidos y distribución.	Materiales de embalaje, cartón, plástico, elementos de protección y productos deteriorados o rechazados durante la distribución.	Los residuos de esta etapa corresponden principalmente a materiales auxiliares de transporte y acondicionamiento. Su gestión depende de la composición y posibilidad de reciclaje, reutilización o recuperación. La integración de criterios de sostenibilidad en la cadena de suministro permite reducir la generación de estos materiales y mejorar su trazabilidad (Enarevba & Haapala, 2024; Robertson et al., 2023).
7. Consumo y gestión de residuos	Uso de productos, devolución, descarte y gestión posterior al consumo.	Envases posconsumo, productos no utilizados, biomasa remanente y materiales descartados.	Esta etapa representa el cierre de la cadena y requiere diferenciar las corrientes según su composición y características regulatorias. En el caso del cannabis medicinal, la presencia potencial de cannabinoides y las restricciones asociadas al contenido de THC pueden condicionar las alternativas de aprovechamiento y exigir tratamientos previos antes de la valorización (Robertson et al., 2023).

Nota. Elaboración propia.

La identificación de las corrientes residuales se realizó considerando las etapas de producción y transformación descritas para la cadena del cannabis y del cáñamo industrial. Las alternativas de aprovechamiento se desarrollan posteriormente en el apartado correspondiente de la presente investigación.

La caracterización anterior permite observar que los residuos no presentan una composición homogénea ni un mismo potencial de aprovechamiento. Las fracciones vegetales generadas durante el cultivo, la cosecha y el procesamiento constituyen las principales corrientes de interés para la valorización, debido a su contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina y a la posibilidad de destinarlas a aplicaciones materiales, biológicas y termoquímicas. En particular, los tallos y sus fracciones de fibra y cañamiza han recibido una atención considerable en la literatura, con aplicaciones que incluyen materiales celulósicos, biocompuestos, bioenergía y productos carbonosos(Hancock et al., 2023) (Marrot et al., 2022)

De manera complementaria, las hojas, inflorescencias y otras fracciones de biomasa residual también presentan posibilidades de aprovechamiento. Se han estudiado procesos de fermentación para la obtención de ácidos grasos volátiles y otros bioproductos, así como rutas de valorización orientadas a la producción de energía y productos de mayor valor agregado (Moscariello et al., 2022) Por otra parte, los residuos de empaque, solventes y productos no utilizados requieren una gestión diferenciada, debido a que su naturaleza y las restricciones regulatorias pueden limitar las alternativas de valorización disponibles(Robertson et al., 2023)

La identificación de las corrientes residuales fue el punto de partida para comparar las alternativas de valorización según criterios técnicos, ambientales y económicos. Esta diferenciación permite establecer una relación entre el tipo de residuo, sus características fisicoquímicas, el nivel de acondicionamiento requerido y la ruta de aprovechamiento potencial, aspectos que fueron analizados en las secciones posteriores de la investigación.

En cuanto a su composición, la literatura reporta que por cada kilogramo de inflorescencia cosechada se generan entre 1,5 y 4,5 kg de tallo, y que los tallos contienen entre 60 % y 80 % de fibras hurds (xilema) y entre 20 % y 40 % de fibras bast (floema) (Pérez Aguilar et al., 2023). Esta diferencia es relevante para la valorización, puesto que las fibras bast se orientan preferentemente a aplicaciones textiles y de refuerzo, mientras que la cañamiza o hurds se destina a materiales de construcción, biocompuestos y conversión termoquímica, como se desarrolla en el apartado 7.3.

La caracterización anterior permite observar que los residuos no presentan una composición homogénea ni un mismo potencial de aprovechamiento. Las fracciones vegetales generadas durante el cultivo, la cosecha y el procesamiento constituyen las principales corrientes de interés

para la valorización, debido a su contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, así como a la posibilidad de destinarlas a aplicaciones materiales, biológicas y termoquímicas. En particular, los tallos y sus fracciones de fibra y cañamiza han recibido una atención considerable en la literatura, con aplicaciones que incluyen materiales celulósicos, biocompuestos, bioenergía y productos carbonosos(Hancock et al., 2023)

De manera complementaria, las hojas, inflorescencias y otras fracciones de biomasa residual también presentan posibilidades de aprovechamiento. Se han estudiado procesos de fermentación para la obtención de ácidos grasos volátiles y otros bioproductos, así como rutas de valorización orientadas a la producción de energía y productos de mayor valor agregado (Moscariello et al., 2022) . Por otra parte, los residuos de empaque, solventes y productos no utilizados requieren una gestión diferenciada, debido a que su naturaleza y las restricciones regulatorias pueden limitar las alternativas de valorización disponibles(Robertson et al., 2023)

En cuanto a su composición, la literatura reporta que por cada kilogramo de inflorescencia cosechada se generan entre 1,5 y 4,5 kg de tallo, y que estos contienen entre 60 % y 80 % de cañamiza/hurds (xilema) y entre 20 % y 40 % de fibras bast (floema) (Pérez Aguilar et al., 2023) . En la Tabla 4 se sintetizan los rangos típicos de composición fisicoquímica reportados en el corpus bibliográfico para las principales fracciones vegetales de *Cannabis sativa*.

Tabla 4. Composición fisicoquímica promedio por fracción residual de Cannabis sativa reportada en la literatura

Fracción residual	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Humedad (%)	Cenizas (%)
Fibra de bast (Floema)	55,0 – 77,0	8,0 – 16,0	3,5 – 10,0	8,0 – 12,0	1,0 – 3,5
Cañamiza / Hurds (Xilema)	38,0 – 51,0	18,0 – 28,0	15,0 – 24,0	9,0 – 13,0	1,5 – 4,5
Hojas y restos de poda	15,0 – 28,0	10,0 – 18,0	8,0 – 14,0	65,0 – 80,0	8,0 – 16,0
Inflorescencias residuales / Cosecha	10,0 – 22,0	8,0 – 15,0	6,0 – 12,0	70,0 – 85,0	6,0 – 12,0
Raíces	30,0 – 42,0	12,0 – 20,0	18,0 – 26,0	50,0 – 70,0	4,0 – 9,0

Nota. Elaboración propia basada en la revisión del corpus bibliográfico (Hancock et al., 2023; Marrot et al., 2022; Pérez Aguilar et al., 2023). Los valores corresponden a porcentajes en base seca (% p/p), a excepción de la humedad que se reporta en base húmeda sobre biomasa fresca.

La identificación de estas corrientes residuales fue el punto de partida para comparar las alternativas de valorización según criterios técnicos, ambientales y económicos. Esta diferenciación permite establecer una relación entre el tipo de residuo, sus características fisicoquímicas, el nivel de acondicionamiento requerido y la ruta de aprovechamiento potencial. Como evidencia empírica de la orientación metodológica de los estudios analizados, la Tabla 5 detalla la frecuencia con la que cada tipo de residuo es abordado dentro del corpus final de 41 investigaciones.

Tabla 5. Frecuencia de abordaje por tipo de residuo en el corpus bibliográfico seleccionado (N = 41)

Tipo de residuo / Fracción analizada	Frecuencia (n)	Porcentaje (%)	Enfoque principal de valorización reportado
Tallos (Fibra bast y Cañamiza/Hurds)	27	65,90%	Biocompuestos, materiales de construcción (*hemp-lime*), textiles, biochar y biomasa energética.
Hojas y biomasa vegetal general	8	19,50%	Compostaje, extracción de bioactivos secundarios, fermentación y producción de biogás/AGV.
Inflorescencias y extracción residual	3	7,30%	Recuperación de cannabinoides residuales, extracción de aceites y valorización biológica.
Residuos no vegetales (Empaques y solventes)	3	7,30%	Gestión de residuos peligrosos, reciclaje químico de polímeros y tratamiento de efluentes.
Total	**41**	**100,00%**	**Corpus definitivo de análisis.**

Nota. Elaboración propia a partir de la codificación temática de los 41 artículos incluidos en el estudio. Un mismo estudio puede mencionar múltiples fracciones, pero se categorizó según la corriente principal de experimentación o análisis.

Como se observa en la Tabla 5, el 65,9 % de las investigaciones se concentra explícitamente en la fracción de los tallos (fibra de bast y cañamiza), sustentando la tendencia de la literatura científica hacia la valorización de biomasa de alta rigidez estructural y contenido celulósico. Esta concentración temática justifica que el análisis de alternativas materiales y termoquímicas desarrollado en el apartado 7.3 priorice estas corrientes residuales.

7.2 Resultados del análisis bibliométrico mediante VOSviewer

Como complemento de la revisión sistemática de literatura, se realizó un análisis bibliométrico mediante VOSviewer orientado a identificar las relaciones de coocurrencia entre términos asociados con Cannabis sativa, residuos, biomasa, aplicaciones industriales y economía circular. El análisis permitió representar la estructura temática del corpus seleccionado y reconocer las relaciones conceptuales presentes en la producción científica revisada.

La tabla 5 sintetiza los principales términos identificados en las redes analizadas y la interpretación temática asignada a cada una de ellas.

Tabla 6. Síntesis de las redes de coocurrencia analizadas mediante VOSviewer.

Red de análisis	Principales términos identificados	Línea temática interpretada
Cannabis sativa – red general	Cannabis sativa, cannabidiol, cannabinoid, hemp, industrial hemp, cultivation, extraction, biomass, circular economy	Caracterización general y diversidad temática de la investigación
Cannabis sativa – waste	hemp waste, hemp stalk, fibre, lignin, pulp, compost, soil, biomass, extraction, sorption	Residuos, biomasa lignocelulósica y alternativas de aprovechamiento
Cannabis sativa – industry	fiber/fibre, stem, residue, pulp, fabric, board, composite material, hemp fibre, hemp waste	Aplicaciones industriales de fibras y fracciones estructurales
Cannabis sativa – circular economy	circular economy, waste, biomass, feedstock, extraction, industrial hemp, bioactive compound	Valorización de residuos y reincorporación de biomasa como materia prima

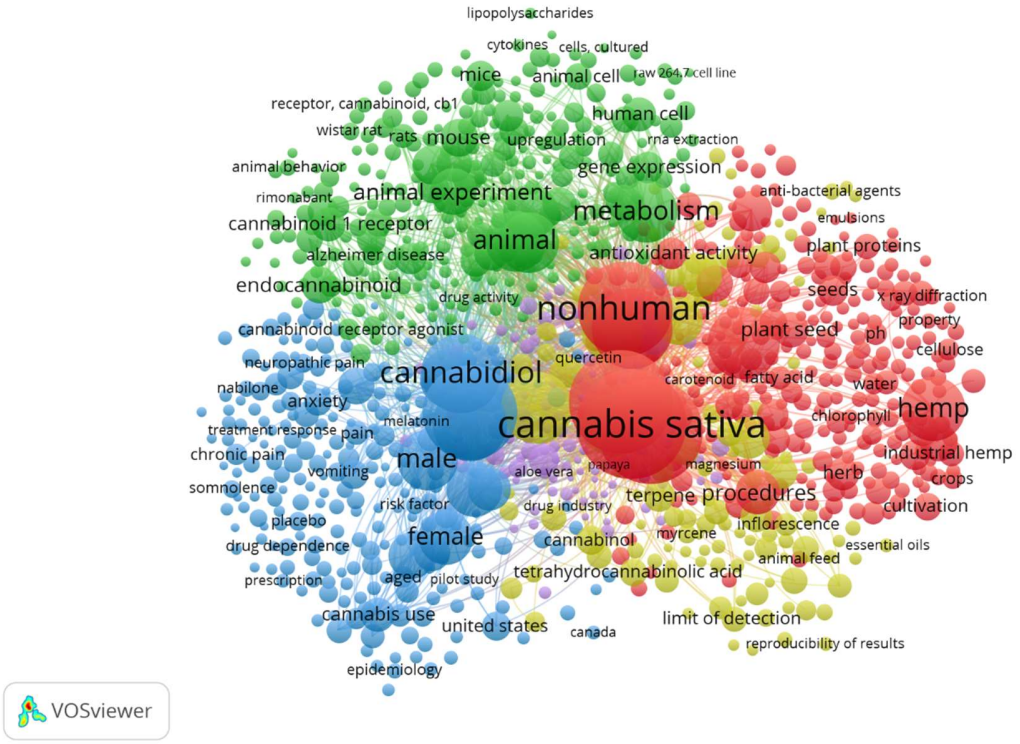
Nota. Elaboración propia con base en VOSviewer.

La Tabla 5 permite organizar los principales conceptos identificados en el análisis y establecer su relación con las dimensiones abordadas en la investigación. En particular, se reconocen términos asociados con la estructura general del campo de *Cannabis sativa*, residuos y biomasa, aplicaciones industriales y economía circular. Esta clasificación sirvió como referencia para interpretar las visualizaciones bibliométricas y organizar posteriormente las alternativas de valorización identificadas en la literatura.

Estructura temática del corpus

La primera representación corresponde al mapa general de coocurrencia presentado en la Figura 2. Esta visualización permitió establecer el contexto temático del corpus y reconocer las relaciones entre los principales conceptos presentes en la producción científica analizada.

Figura 2. Red general de coocurrencia de palabras clave asociadas con Cannabis sativa.



Nota. Elaboración propia con VOSviewer.

En esta red, *Cannabis sativa* se relaciona con términos asociados tanto con aplicaciones medicinales y farmacológicas como con cultivo, extracción, biomasa, cáñamo industrial y economía circular. Esta configuración muestra que la producción científica relacionada con la especie comprende diferentes campos de aplicación y que el aprovechamiento de biomasa constituye una línea integrada dentro de un campo de investigación más amplio.

A partir de la estructura general de la red se identificaron términos relacionados específicamente con residuos y biomasa. Entre ellos se encuentran *hemp waste*, *hemp stalk*, *fibre*, *lignin*, *pulp*, *biomass*, *compost*, *soil* y *sorption*. La presencia conjunta de estos conceptos permitió reconocer

diferentes relaciones entre los residuos generados por el cáñamo y sus posibles rutas de aprovechamiento.

En particular, la coexistencia de *hemp waste*, *hemp stalk*, *fibre*, *lignin* y *pulp* permite reconocer una línea temática asociada con el aprovechamiento de fracciones lignocelulósicas. De manera paralela, la presencia de *compost* y *soil* evidencia una línea relacionada con aplicaciones biológicas y recuperación de materia orgánica. Asimismo, la aparición de *sorption* permite identificar aplicaciones ambientales asociadas con el uso de materiales derivados del cáñamo para procesos de remoción o tratamiento de contaminantes.

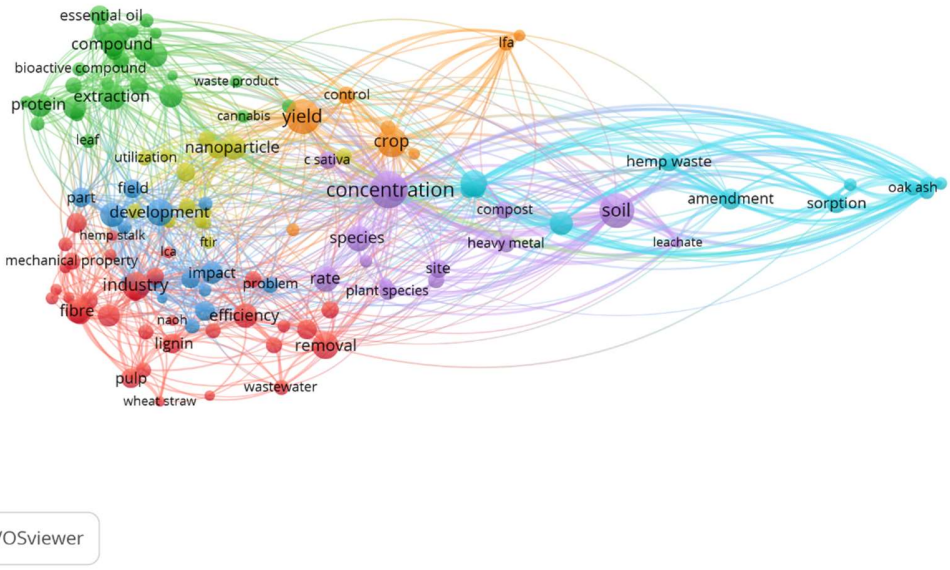
La misma red permite reconocer la relación de las fracciones estructurales de la planta con aplicaciones industriales. Términos como *stem*, *fiber/fibre*, *pulp*, *fabric*, *board* y *composite material* aparecen articulados con conceptos relacionados con residuos y cáñamo industrial, evidenciando una línea de investigación centrada en la transformación de las fracciones estructurales de la planta hacia materiales y productos industriales.

En síntesis, la estructura de relaciones identificada permitió establecer los principales ejes temáticos utilizados posteriormente para organizar las alternativas de valorización según el tipo de residuo, sus características como biomasa y las posibles rutas de transformación.

Concentración de los principales términos

Como complemento de la estructura de relaciones identificada en la Figura 2, la Figura 3 presenta el mapa de densidad obtenido mediante VOSviewer. Esta visualización permite observar las zonas donde se concentra la presencia de los términos dentro del corpus y facilita la identificación de los conceptos que presentan mayor concentración en la estructura temática.

Figura 3. Mapa de densidad de los principales términos identificados en el corpus.



Nota. Elaboración propia con VOSviewer.

La distribución de la densidad permite diferenciar los términos y agrupaciones que presentan mayor concentración dentro de la estructura bibliométrica de aquellos que aparecen en posiciones más periféricas. En este sentido, la representación complementa el mapa de red al permitir observar no solamente las relaciones entre conceptos, sino también las zonas de mayor concentración temática.

La presencia de términos asociados con *Cannabis sativa*, residuos, biomasa, cáñamo industrial y procesos de transformación permite identificar los principales ejes de concentración del corpus. De manera complementaria, términos relacionados con fibras, tallos, pulpa y materiales permiten reconocer la importancia de las fracciones lignocelulósicas y sus aplicaciones dentro de la literatura analizada.

Esta visualización también permite contextualizar los términos relacionados con economía circular. La coexistencia de *waste*, *biomass*, *feedstock*, *extraction*, *industrial hemp* y *bioactive compound* evidencia una articulación conceptual entre la generación de residuos, la disponibilidad de biomasa y su utilización potencial como materia prima secundaria.

A partir de esta estructura se identifica una relación conceptual entre el residuo y su posible transformación e incorporación a procesos posteriores. En este sentido, términos como *biomass*

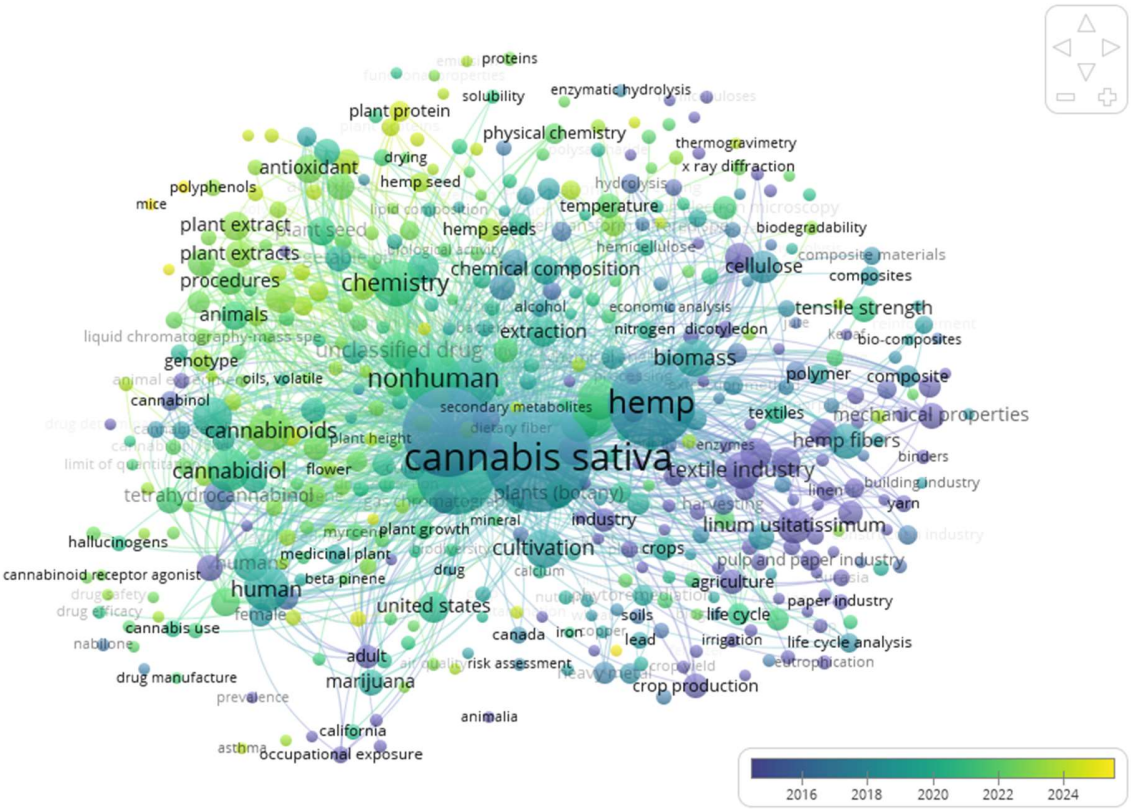
y *feedstock* permiten reconocer una transición desde el residuo como material descartado hacia el residuo como recurso potencial para nuevos procesos de transformación.

La visualización de densidad permitió priorizar los núcleos temáticos con mayor presencia dentro del corpus y utilizarlos como referencia para organizar las categorías de valorización desarrolladas posteriormente.

Evolución temporal de las líneas de investigación

La tercera representación corresponde al mapa temporal presentado en la Figura 4. Esta visualización permite observar la distribución temporal de los términos identificados y reconocer la evolución de las líneas temáticas relacionadas con *Cannabis sativa*, residuos, biomasa y valorización.

Figura 4. Mapa de superposición temporal de los términos asociados con *Cannabis sativa*.



Nota. Elaboración propia con VOSviewer.

La distribución temporal permite diferenciar los conceptos asociados con líneas de investigación consolidadas de aquellos que adquieren presencia en etapas más recientes del periodo analizado. La Figura 4 presenta el mapa de superposición temporal (Overlay Visualization) generado mediante VOSviewer, en el cual la escala de color, comprendida entre 2016 y 2024, representa el año promedio de publicación asociado a cada término.

Los términos con año promedio más antiguo (tonalidad azul-morada, en torno a 2016-2017) corresponden predominantemente a un enfoque clínico y farmacológico: mice, cannabinoid receptor agonist, hallucinogens, nabilone, drug safety, drug efficacy y prevalence. Los términos centrales del corpus (tonalidad verde-azulada, en torno a 2018-2020) —cannabis sativa, hemp, cannabinoids, cannabidiol, tetrahydrocannabinol, chemistry, extraction, chemical composition, biomass, cultivation— constituyen el núcleo temático consolidado de la literatura, articulando la caracterización química y agronómica de la planta. En contraste, los términos con año promedio más reciente (tonalidad amarillo-verde, en torno a 2022-2024) se concentran de manera consistente en aplicaciones industriales y de materiales: cellulose, composites, bio-composites, mechanical properties, tensile strength, hemp fibers, textile industry, pulp and paper industry, building industry, life cycle analysis, así como en procesos de aprovechamiento como enzymatic hydrolysis, hemicellulose y biodegradability.

Esta evolución resulta relevante para la investigación porque evidencia un desplazamiento progresivo del foco de la literatura: desde una etapa inicial orientada al estudio farmacológico y clínico del cannabis, hacia una etapa intermedia centrada en su caracterización química y biomásica, y finalmente hacia una etapa reciente orientada al aprovechamiento industrial de sus fracciones residuales, fibras, celulosa y biomasa, en aplicaciones de materiales compuestos, textiles, construcción y análisis de ciclo de vida.

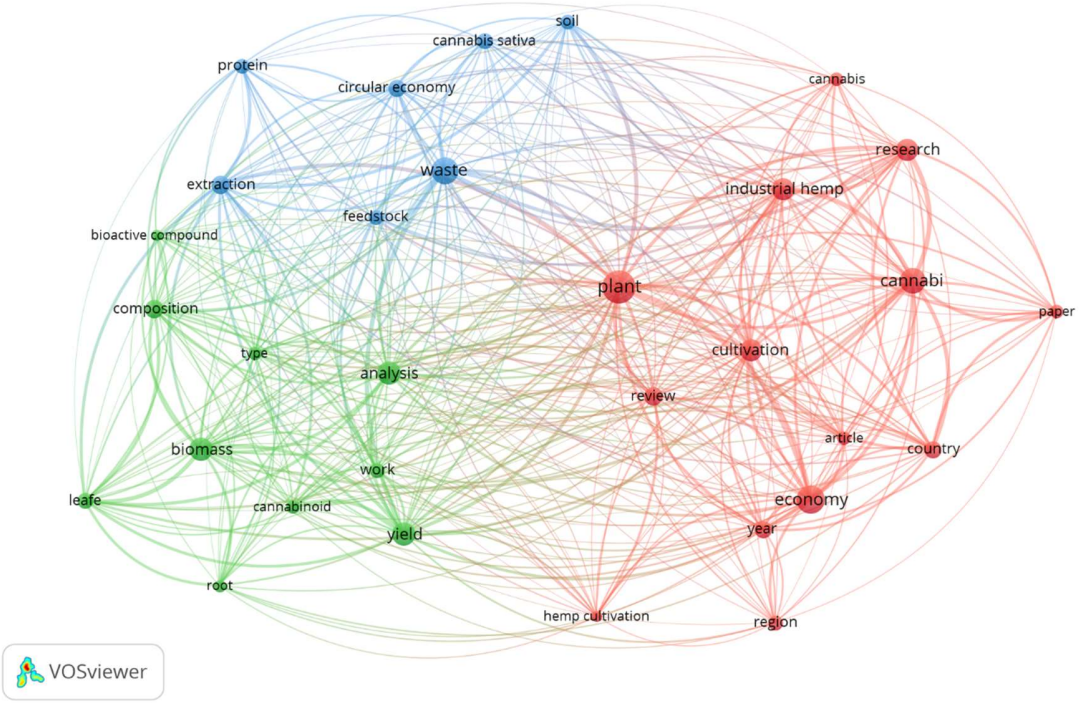
De esta manera, el análisis temporal complementa las redes anteriores al incorporar una dimensión de evolución que permite comprender cómo se han articulado los diferentes conceptos a lo largo del periodo de estudio, y confirma empíricamente que el interés por la valorización industrial de residuos y subproductos de Cannabis sativa es un desarrollo reciente dentro de la literatura, concentrado principalmente en el tramo 2022-2024 de la ventana analizada.

La evolución temporal identificada permitió sustentar la incorporación de la economía circular y la valorización de residuos como dimensiones centrales del análisis y orientar la revisión de las alternativas de aprovechamiento hacia las líneas temáticas que han adquirido relevancia dentro del periodo estudiado.

Vacío relacionado con Industria 4.0

Finalmente, se realizó una exploración específica de los términos asociados con la dimensión económica de la gestión de residuos de Cannabis sativa. La Figura 5 presenta esta visualización, correspondiente a la red generada a partir de la búsqueda "cannabis sativa" AND "economy".

Figura 5. Red de coocurrencia de términos para la búsqueda "cannabis sativa" AND "economy".



Nota. Elaboración propia con VOSviewer.

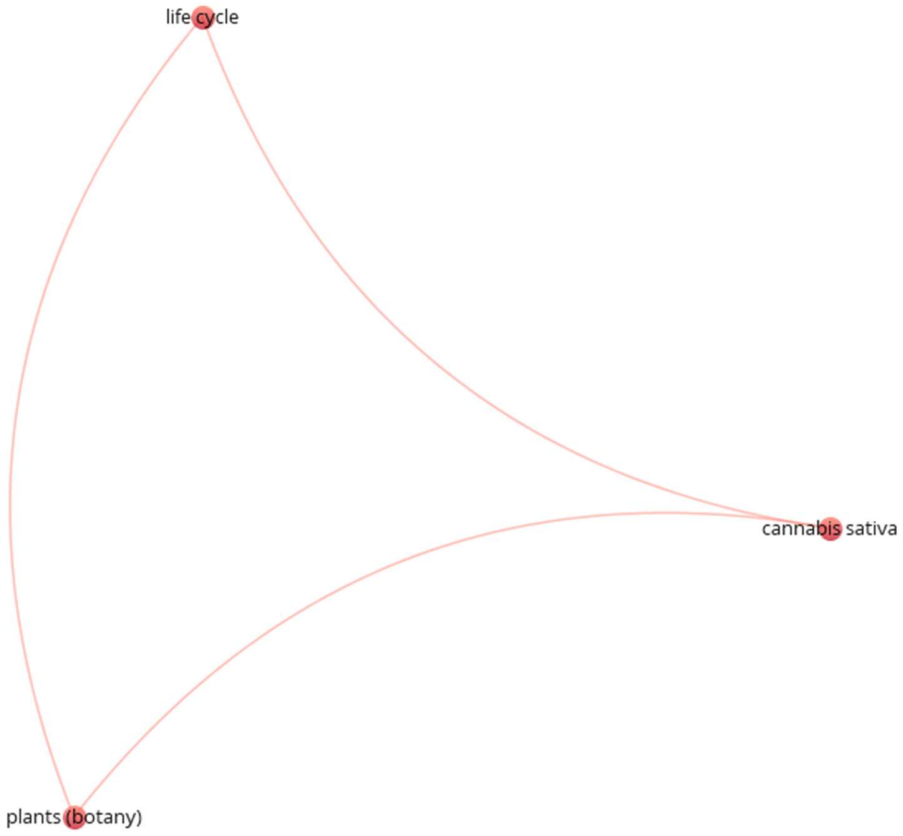
Esta representación permite identificar los términos predominantes en este subconjunto del corpus: waste, feedstock, biomass, cannabinoid, region, country y hemp cultivation. Estos conceptos confirman la orientación del corpus hacia la valorización de biomasa y subproductos, y hacia su dimensión geográfica y productiva (región, país, cultivo de cáñamo), más que hacia una articulación con tecnologías digitales de gestión.

Se observa que ningún término asociado con Industria 4.0 (Internet of Things, blockchain, traceability, digital twin) aparece entre los conceptos con mayor ocurrencia o fuerza de vínculo en esta red. Esto no implica que dichas tecnologías sean incompatibles con la gestión de residuos de Cannabis sativa, sino que evidencia, en esta etapa exploratoria del corpus, un campo aún no

consolidado en la literatura revisada. La incorporación de mecanismos de trazabilidad, monitoreo en tiempo real y gestión inteligente de información representa así una línea de desarrollo con potencial para fortalecer la cadena de suministro de residuos de biomasa de Cannabis sativa, particularmente en el control de trazabilidad regulatoria y la optimización logística de la recolección y el transporte de subproductos.

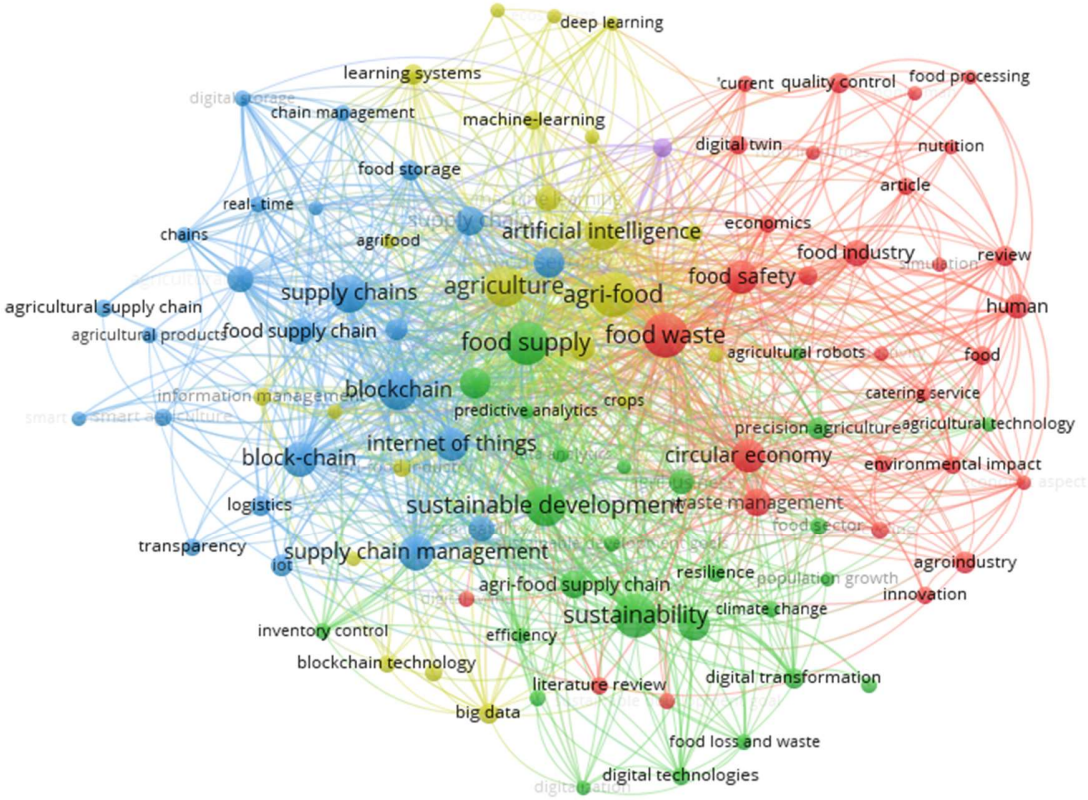
Con el fin de cuantificar esta observación exploratoria, se ejecutaron dos búsquedas adicionales en Scopus (apartado 6.3), contrastando la presencia de términos de Industria 4.0 en el corpus específico de residuos de Cannabis sativa y cáñamo frente al sector agroalimentario general. La primera búsqueda devolvió 3 registros; la segunda, 222. Las Figuras 6 y 7 presentan las redes de coocurrencia generadas a partir de cada uno de estos corpus.

Figura 6. Red de coocurrencia de términos para la búsqueda combinada de residuos de Cannabis sativa y tecnologías de Industria 4.0.



Nota. Elaboración propia con VOSviewer.

Figura 7. Red de coocurrencia de términos para la búsqueda combinada del sector agroalimentario general y tecnologías de Industria 4.0.



Nota. Elaboración propia con VOSviewer.

La Figura 6 muestra que, incluso al restringir el análisis a los tres registros identificados, ninguno de los términos de Industria 4.0 utilizados en la ecuación de búsqueda (Internet of Things, blockchain, traceability, digital twin, industry 4.0) aparece entre los descriptores del corpus; los únicos conceptos presentes son life cycle, cannabis sativa y plants (botany), sin conexión temática alguna con tecnologías digitales. En contraste, la Figura 7 evidencia una red densa y multiclúster, en la que los conceptos de Industria 4.0 blockchain, internet of things, digital twin, artificial intelligence, machine-learning, big data, digital technologies, supply chain management, aparecen como nodos centrales, fuertemente conectados con food waste, agri-food, circular economy, sustainability y agricultural supply chain.

Esta diferencia, 3 frente a 222 registros, y la ausencia total de términos de Industria 4.0 en la Figura 6 frente a su presencia estructural en la Figura 7, constituye evidencia bibliométrica de una integración documentada aún limitada entre la gestión de residuos de esta cadena y las herramientas de trazabilidad y monitoreo digital, y sustenta la incorporación de la Industria 4.0 como dimensión de análisis en el apartado 7.6.

7.3 Alternativas de valorización de los residuos de Cannabis sativa

Los residuos generados a lo largo de la cadena de suministro de Cannabis sativa representan una fuente potencial de materias primas secundarias que puede ser incorporada a diferentes procesos de valorización. En particular, los tallos, fibras, cañamiza o *hurds*, hojas y biomasa residual posterior a procesos de transformación presentan características lignocelulósicas que permiten su aprovechamiento mediante rutas físicas, químicas, biológicas y termoquímicas. Desde el enfoque de economía circular, estas alternativas permiten superar la concepción del residuo como material destinado exclusivamente a disposición final, para considerarlo como un recurso susceptible de reincorporación a nuevos ciclos productivos.

La literatura científica evidencia que la valorización de la biomasa residual de Cannabis sativa puede orientarse hacia productos de diferente nivel de valor agregado, desde materiales fibrosos y productos de construcción hasta bioplásticos, biocompuestos y productos energéticos. Esta diversidad de aplicaciones se relaciona con la composición de los residuos, particularmente con su contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, así como con las características físicas de las fibras y de la biomasa remanente después de los procesos de extracción. En este sentido, las alternativas identificadas permiten establecer diferentes rutas de aprovechamiento dependiendo del tipo de residuo y de los requerimientos técnicos del proceso de transformación (Basak, 2025)

De acuerdo con la literatura revisada, las principales alternativas de valorización con potencial de aplicación a los residuos de Cannabis sativa corresponden a la obtención de fibras textiles, bioplásticos, biocompuestos, productos bioenergéticos y materiales para construcción sostenible. Estas alternativas se presentan a continuación, considerando tanto la evidencia experimental disponible como las oportunidades y limitaciones asociadas con su implementación.

7.3.1 Fibras textiles

La obtención de fibras textiles constituye una de las rutas de valorización más directamente relacionadas con los tallos residuales de Cannabis sativa. Los tallos provenientes de cultivos medicinales o industriales son frecuentemente descartados después de la cosecha, a pesar de contener fibras celulósicas susceptibles de ser separadas y procesadas. Un estudio realizado en

Colombia demostró experimentalmente que los tallos descartados de plantas de Cannabis sativa cultivadas con fines medicinales pueden someterse a un proceso de enriado en agua (*water retting*) para obtener fibras celulósicas con características físicas, químicas y mecánicas comparables con otras fibras naturales utilizadas en aplicaciones textiles. El estudio resulta particularmente relevante para el contexto colombiano, debido a que los residuos utilizados procedían de cultivos medicinales localizados en Medellín. (Obregón et al., 2023)

El proceso evaluado comprende etapas de humectación o enriado, separación de las fibras, lavado, secado, cardado y posterior hilado. Los autores encontraron que las fibras obtenidas presentaron propiedades compatibles con fibras naturales como coco, cáñamo, sisal y yute, demostrando la posibilidad de transformar un residuo agrícola en una materia prima destinada a la fabricación de productos textiles. Asimismo, el estudio plantea que la utilización de los tallos residuales puede contribuir a una mayor utilización integral de los recursos generados por los cultivos de Cannabis sativa.

Esta alternativa también encuentra respaldo en estudios realizados sobre cáñamo industrial. Una revisión y evaluación comparativa sobre la sostenibilidad y aplicación de fibras vegetales señala que la fibra de cáñamo presenta características que le permiten competir ventajosamente con fibras convencionales como el algodón, destacando su potencial desde las perspectivas económica y ambiental. En particular, al analizar el ciclo de vida y los escenarios de producción agrícola, se estimó una reducción del 77,63 % en los costos asociados a las actividades agrícolas frente al cultivo de algodón, sumado a una productividad de fibra por hectárea sensiblemente superior en los escenarios evaluadosduq(Duque Schumacher et al., 2020)

Por tanto, la valorización textil de los tallos puede interpretarse como una estrategia de aprovechamiento material, debido a que permite mantener la materia lignocelulósica dentro del ciclo productivo durante un periodo mayor, evitando su eliminación y generando productos con mayor valor agregado. No obstante, su implementación requiere considerar variables como el método de separación de fibras, consumo de agua durante el enriado, calidad y longitud de las fibras, presencia de impurezas y requerimientos tecnológicos de hilatura.

7.3.2 Biocompuestos

Los biocompuestos constituyen otra alternativa de aprovechamiento de los residuos fibrosos de Cannabis sativa, especialmente cuando las fibras, partículas de cañamiza o hurds se incorporan como material de refuerzo o carga dentro de una matriz polimérica. A diferencia de los bioplásticos, donde el objetivo principal es producir el polímero biodegradable, en los biocompuestos la biomasa vegetal puede desempeñar la función de refuerzo, relleno o fase estructural dentro de un material compuesto.

Una revisión identificó las fibras de cáñamo como materiales de interés para la fabricación de compuestos reforzados con fibras naturales debido a su baja densidad, biodegradabilidad y relación favorable entre resistencia y peso. Sin embargo, los autores señalan que las fibras presentan una naturaleza hidrofílica que puede generar problemas de compatibilidad con matrices poliméricas hidrofóbicas, por lo que los tratamientos superficiales y pretratamientos adquieren importancia para mejorar la interacción fibra-matriz.(Liu et al., 2017)

La valorización de la cañamiza también ha sido estudiada específicamente mediante su incorporación en matrices poliméricas. En el estudio evaluaron el uso de *hemp hurds*, considerados un subproducto de bajo valor económico, como aditivo de origen biológico en biocompuestos basados en ácido poliláctico (PLA). El estudio evidencia que este residuo puede incorporarse a materiales poliméricos, contribuyendo al aprovechamiento de una fracción de la biomasa que tradicionalmente puede ser descartada o destinada a aplicaciones de menor valor.(Momeni et al., 2021)

Asimismo, estudios sobre fibras de cáñamo reforzadas con matrices poliméricas han demostrado que los tratamientos químicos pueden modificar las propiedades de adhesión y comportamiento mecánico de los materiales. Por ejemplo, Sullins et al. encontraron mejoras en las propiedades mecánicas de compuestos de polipropileno reforzados con fibra de cáñamo mediante tratamientos de la fibra y modificación de la matriz.(Sullins et al., 2017)

En consecuencia, los biocompuestos constituyen una ruta de valorización que permite aprovechar tanto fibras como partículas provenientes de tallos y cañamiza, con potencial de aplicación en sectores como automoción, mobiliario, empaques, productos técnicos y componentes semiestructurales. No obstante, la humedad, la compatibilidad fibra-matriz, la estabilidad térmica y la uniformidad de la materia prima constituyen aspectos que deben ser considerados para su implementación industrial.

7.3.3 Bioenergía

La valorización energética constituye una alternativa para aquellos residuos cuya calidad, composición o estado de contaminación no permita un aprovechamiento material directo. En este caso, la biomasa residual de Cannabis sativa puede utilizarse mediante procesos bioquímicos o termoquímicos para obtener combustibles, productos intermedios o materiales carbonosos.

Una investigación posterior evaluó la utilización de residuos de biomasa de cáñamo, incluyendo cañamiza y mezclas de hojas e inflorescencias, mediante fermentación acidogénica para producir ácidos grasos volátiles (AGV). El estudio reportó rendimientos de hasta 651 ± 65 mg de ácido

acético por gramo de sólidos volátiles cuando se utilizó una mezcla de residuos de cáñamo y lactosuero, alcanzándose además hasta un 94 % de ácido acético respecto al total de AGV. Los autores realizaron adicionalmente una evaluación tecnoeconómica preliminar, mostrando posibilidades de generación de productos con valor económico a partir de estas corrientes residuales.(Moscariello et al., 2024)

Otra ruta corresponde a la conversión termoquímica, en la que se ha estudiado la valorización de tallos residuales de cáñamo procedentes de la industria del cannabidiol mediante procesos de pirólisis. El estudio plantea la obtención de biocombustibles sólidos y materiales carbonosos conductores, ampliando las posibilidades de aprovechamiento de la biomasa más allá de su utilización como combustible convencional.(Marrot et al., 2022)

Estas alternativas resultan particularmente relevantes dentro de un esquema de economía circular porque permiten aprovechar fracciones residuales que no necesariamente presentan las características requeridas para aplicaciones textiles o materiales. Sin embargo, desde una perspectiva de jerarquía de valorización, el aprovechamiento energético debería priorizarse para aquellas fracciones que no puedan ser reincorporadas de manera técnica y económicamente viable a aplicaciones materiales de mayor valor agregado.

7.3.4 Materiales para construcción sostenible

Los residuos lignocelulósicos de Cannabis sativa, especialmente la cañamiza o hemp hurds, también presentan potencial para la fabricación de materiales de construcción sostenible. Esta alternativa se fundamenta principalmente en la estructura porosa y las propiedades térmicas y acústicas de las partículas provenientes de la parte interna del tallo.

Uno de los materiales más estudiados corresponde al hempcrete, elaborado mediante la combinación de cañamiza de cáñamo con un aglomerante, generalmente a base de cal. Un estudio evaluó las propiedades mecánicas y térmicas de bloques elaborados con cal y cañamiza de cáñamo, encontrando que la densidad del material influye en sus propiedades mecánicas y en su conductividad térmica. El estudio destaca además la capacidad del material para contribuir al aislamiento térmico y acústico y para regular la humedad interna debido a la estructura porosa de la cañamiza.(Elfordy et al., 2008)

Posteriormente, estudios de revisión han señalado que el hempcrete constituye una alternativa de interés para la construcción sostenible debido a su potencial para disminuir el uso de recursos convencionales y aprovechar una biomasa renovable. No obstante, su menor resistencia mecánica frente a materiales estructurales convencionales limita su utilización en determinados elementos, por lo que su aplicación se orienta principalmente hacia cerramientos, aislamiento y elementos no estructurales (Steyn et al., 2025)

En este sentido, la valorización de la cañamiza para materiales de construcción permite transformar un residuo agrícola en un producto con una vida útil prolongada, favoreciendo el almacenamiento de carbono y la reducción de la demanda de materiales de origen fósil o de alta intensidad energética. Sin embargo, para su implementación en Colombia resulta necesario considerar aspectos relacionados con las características de la biomasa disponible, los sistemas constructivos locales, la normativa técnica, la disponibilidad de aglomerantes y los costos logísticos asociados con la recolección y procesamiento del residuo.

Estos antecedentes permiten identificar que la valorización de los residuos de Cannabis sativa para construcción sostenible no se limita al *hempcrete*. Las fibras, tallos y partículas de la biomasa pueden ser incorporados en ladrillos, paneles, elementos aislantes y otros biocompuestos, dependiendo de sus características físicas y de los requerimientos del producto final. Desde la perspectiva de economía circular, estas aplicaciones presentan especial interés debido a que permiten mantener la biomasa residual dentro de ciclos productivos de mayor duración, disminuyendo la necesidad de disponerla como residuo y generando productos con una vida útil prolongada.

7.3.5 Cosméticos y productos de cuidado personal

Una alternativa adicional para la valorización de Cannabis sativa corresponde al desarrollo de ingredientes destinados a la industria cosmética y de cuidado personal. Esta ruta resulta de interés dentro del enfoque de economía circular debido a la diversidad de compuestos presentes en diferentes fracciones de la planta, entre ellos ácidos grasos, fitoesteroles, tocoferoles, terpenos, flavonoides y otros metabolitos secundarios que han sido estudiados por su potencial aplicación en formulaciones cosméticas. En particular, la literatura científica ha señalado el interés del aceite de semilla de cáñamo y de determinados compuestos bioactivos derivados de Cannabis sativa para aplicaciones tópicas y cosméticas (Mnekin & Ripoll, 2021)

Entre las materias primas de mayor interés se encuentra el aceite de semilla de cáñamo, caracterizado por una elevada proporción de ácidos grasos poliinsaturados. Se identificaron como principales componentes del aceite los ácidos linoleico, α-linolénico y oleico, además de compuestos de la fracción insaponificable como β-sitosterol, campesterol, fitol y γ-tocoferol. Esta composición ha favorecido el interés del aceite como materia prima para productos destinados al cuidado de la piel y otras aplicaciones cosméticas. (Claro-Cala et al., 2022)

Desde una perspectiva de valorización, estas características permiten considerar la transformación de determinadas fracciones de Cannabis sativa en ingredientes de mayor valor agregado, tales como aceites, extractos y otros componentes empleados en formulaciones de cremas, lociones, productos de limpieza facial, bálsamos y productos para el cuidado capilar.

Mnekin y Ripoll señalan que el aceite de semilla de cáñamo contiene, además de ácidos grasos, compuestos minoritarios como terpenos, flavonoides, carotenoides y fitoesteroles, los cuales han despertado interés por sus posibles aplicaciones en formulaciones tópicas.(Mnekin & Ripoll, 2021)

Asimismo, la investigación reciente sobre Cannabis sativa en la industria cosmecéutica evidencia un creciente interés por el aprovechamiento de metabolitos secundarios y cannabinoides como ingredientes potenciales. de Andrade et al. destacan que la industria cosmecéutica constituye uno de los campos de aplicación de los compuestos de Cannabis sativa y señalan la importancia de desarrollar estrategias biotecnológicas que permitan disponer de materias primas estandarizadas y de calidad para este sector. Por tanto, la valorización de la biomasa no debe limitarse a su transformación directa, sino que puede incorporar procesos de extracción, separación y purificación orientados a recuperar compuestos de mayor valor comercial.(de Andrade et al., 2023)

En el contexto de la economía circular, esta alternativa puede adquirir particular importancia cuando determinadas fracciones vegetales generadas durante la cadena de suministro son consideradas subproductos y presentan compuestos susceptibles de recuperación. Sin embargo, no toda la biomasa residual de Cannabis sativa puede destinarse directamente a la fabricación de cosméticos. La composición química, el contenido de cannabinoides, la presencia de contaminantes, las condiciones de cultivo y almacenamiento y las características microbiológicas del material deben ser evaluadas previamente. Por ello, una posible ruta de valorización comprende la selección y caracterización de la biomasa, seguida de procesos de extracción y purificación, obtención del ingrediente cosmético y, finalmente, su incorporación en formulaciones que cumplan los requisitos de calidad y seguridad.

Esta consideración es especialmente relevante en Colombia. De acuerdo con el Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (INVIMA, 2018) , los productos cosméticos que contienen ingredientes derivados de cannabis deben cumplir la normativa sanitaria aplicable, la cual está enmarcada en el régimen armonizado de la Comunidad Andina mediante la Decisión 833 de 2018(Comisión de la Comunidad Andina, 2018) . Asimismo, las operaciones de cultivo, transformación y aprovechamiento de derivados no psicoactivos se rigen por el Decreto 811 de 2021 (Congreso de la República de Colombia, 2021) y la Resolución 227 de 2022, las cuales reglamentan el uso industrial del grano, fibra y componentes vegetales. En este contexto, el (INVIMA, 2018) exige el cumplimiento de la Notificación Sanitaria Obligatoria (NSO), la trazabilidad y documentación técnica de la materia prima, así como la cuantificación estricta de tetrahidrocannabinol (THC), garantizando que los niveles se

mantengan por debajo de los límites normativos tanto en los ingredientes como en el producto terminado.

En consecuencia, la valorización cosmética representa una alternativa de alto valor agregado dentro de la gestión de residuos y subproductos de Cannabis sativa, pero su viabilidad depende de una adecuada clasificación de las fracciones de biomasa, caracterización fisicoquímica y microbiológica, trazabilidad, control de cannabinoides y cumplimiento de los requisitos regulatorios. Desde la perspectiva de la cadena de suministro, esto permite plantear una estrategia de aprovechamiento diferenciada en la que las fracciones con características apropiadas puedan dirigirse hacia la recuperación de compuestos de mayor valor, mientras que las restantes sean destinadas a otras rutas de valorización, como fibras, biocompuestos, materiales de construcción, bioenergía o procesos biológicos.

De esta manera, el aprovechamiento cosmético contribuye al enfoque de economía circular al desplazar determinadas fracciones de biomasa desde esquemas de disposición o aprovechamientos de menor valor hacia cadenas productivas capaces de generar ingredientes y productos de mayor valor agregado. No obstante, para el caso específico de residuos de la agroindustria colombiana de Cannabis sativa, esta alternativa debe considerarse como una ruta potencial de valorización que requiere validación técnica, económica, sanitaria y regulatoria antes de su implementación a escala industrial.

7.3.6 Papel y materiales celulósicos

Los residuos lignocelulósicos generados durante el cultivo y procesamiento de Cannabis sativa, particularmente los tallos y las fracciones fibrosas, representan una fuente potencial de materia prima para la obtención de papel y otros materiales basados en celulosa. Esta alternativa se fundamenta en la composición estructural de la biomasa vegetal, constituida principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, componentes que pueden ser separados y acondicionados mediante diferentes procesos para obtener fibras con características apropiadas para aplicaciones celulósicas. En este sentido, la valorización de los tallos permite transformar una fracción residual de la cadena productiva en una materia prima secundaria para nuevos procesos industriales.

La literatura sobre fibras de cáñamo ha evidenciado el interés de esta biomasa como fuente de fibras celulósicas debido a sus características morfológicas y a su contenido de celulosa. Se destaca el potencial de las fibras de cáñamo como una alternativa sostenible frente a fibras convencionales, considerando factores relacionados con productividad, costos y desempeño ambiental. (Duque Schumacher et al., 2020)De manera complementaria, se demuestra experimentalmente la posibilidad de recuperar fibras a partir de tallos descartados de Cannabis

sativa procedentes de cultivos medicinales en Colombia, mediante un proceso de enriamiento con agua, lavado, secado, cardado y posterior procesamiento de la fibra. Los autores señalaron que las fibras obtenidas presentaron características comparables con otras fibras vegetales de uso industrial, evidenciando el potencial de esta fracción residual para diferentes aplicaciones de materiales.(Obregón et al., 2023)

7.3.7 Biochar y materiales adsorbentes

Los residuos lignocelulósicos generados durante la cadena de suministro de Cannabis sativa, particularmente tallos, cañamiza, hojas y otras fracciones vegetales que no son aprovechadas en las etapas de transformación, pueden ser considerados materias primas potenciales para la producción de biochar y materiales adsorbentes. Esta alternativa se fundamenta en la transformación termoquímica de la biomasa, mediante procesos como la pirólisis, que permiten obtener materiales carbonosos con propiedades fisicoquímicas susceptibles de ser aprovechadas en aplicaciones ambientales y productivas. De esta manera, un residuo de bajo valor puede convertirse en un material funcional, prolongando su ciclo de vida y reduciendo la necesidad de disposición final.

En el caso específico de los residuos de Cannabis sativa, la valorización de subproductos de tallos de cáñamo procedentes de la industria del cannabidiol mediante conversión termoquímica. Los autores evidenciaron que estos residuos pueden transformarse en productos carbonosos con potencial para aplicaciones energéticas y eléctricas, incluyendo materiales de carbono conductores destinados a aplicaciones como materiales compuestos, electrodos y sensores. Este resultado demuestra que la valorización termoquímica no necesariamente debe limitarse a la producción de energía, sino que puede orientarse hacia productos de mayor valor agregado. (Marrot et al., 2022)

Desde la perspectiva de los materiales adsorbentes, la estructura lignocelulósica de los residuos de Cannabis sativa constituye un punto de partida favorable para la obtención de materiales carbonosos con capacidad de interacción con diferentes contaminantes. Mediante procesos de carbonización y, cuando sea necesario, activación física o química, es posible modificar características como la porosidad, el área superficial y la presencia de grupos funcionales superficiales. Estas propiedades determinan, en buena medida, la capacidad del material para retener compuestos presentes en agua, aire u otras matrices.

Esta alternativa resulta especialmente relevante dentro de un enfoque de economía circular debido a que permite establecer un ciclo de valorización de residuos hacia aplicaciones ambientales. Por ejemplo, un residuo generado durante el cultivo o procesamiento de Cannabis sativa podría transformarse en un material carbonoso destinado al tratamiento de corrientes

contaminadas, reduciendo simultáneamente la cantidad de biomasa que requiere disposición y la dependencia de materiales adsorbentes convencionales. No obstante, la viabilidad de esta alternativa depende de factores como la composición inicial de la biomasa, las condiciones del proceso termoquímico, el rendimiento de conversión, las características del biochar obtenido y el contaminante objetivo.

En términos de la cadena de suministro, los tallos y otras fracciones lignocelulósicas que presentan baja valorización en las etapas de cosecha y procesamiento podrían ser dirigidos hacia procesos descentralizados o especializados de transformación termoquímica. Esto permitiría integrar una corriente residual dentro de un esquema de aprovechamiento en cascada, en el cual los materiales con mayor potencial económico sean destinados prioritariamente a aplicaciones de mayor valor, mientras que las fracciones no aptas para otros usos puedan ser aprovechadas para la producción de biochar o materiales adsorbentes.

El aprovechamiento termoquímico de residuos de Cannabis sativa para la obtención de biochar y materiales adsorbentes representa una alternativa complementaria a otras rutas de valorización identificadas en esta revisión. Su principal aporte al enfoque de economía circular radica en transformar fracciones residuales de bajo aprovechamiento en materiales funcionales con potencial energético, ambiental y tecnológico, contribuyendo a disminuir la disposición de biomasa y a ampliar el portafolio de productos derivados de los residuos generados en la cadena de suministro.(Marrot et al., 2022)

7.3.8 Compostaje y enmiendas para suelos

El compostaje y el aprovechamiento de residuos vegetales como enmiendas para suelos constituyen alternativas de valorización orientadas principalmente al reciclaje de nutrientes y materia orgánica dentro de los sistemas agroindustriales. En el caso de Cannabis sativa, los residuos generados durante la cosecha y el procesamiento, especialmente tallos, hojas y otras fracciones vegetales, presentan un contenido significativo de materia orgánica y nutrientes que puede ser recuperado mediante procesos biológicos controlados. Esta alternativa permite reducir la cantidad de biomasa destinada a disposición final y reincorporar parte de sus componentes al ciclo productivo agrícola.

La literatura evidencia que los residuos de Cannabis sativa pueden presentar una degradación relativamente lenta debido a su composición lignocelulósica. Al estudiar la descomposición de residuos vegetales en un ambiente de compostaje, se observó que la paja de Cannabis sativa presentó mayor estabilidad durante el proceso de compostaje que la paja de trigo. Este comportamiento se relaciona con la estructura y composición del material vegetal y evidencia la importancia de controlar variables como humedad, oxigenación, temperatura, tamaño de

partícula y composición de la mezcla para favorecer una descomposición eficiente.(Dresbøll & Magid, 2006)

Una evidencia más específica para los residuos de cannabis proviene de un estudio que evaluó la conversión de biomasa residual de Cannabis sativa mediante digestión microbiana en condiciones de finca. Después de un periodo de aproximadamente tres semanas, la biomasa fue transformada en un material con mayor disponibilidad de nutrientes y un perfil nutricional comparable con compost terminado. Adicionalmente, el fertilizante obtenido presentó efectos favorables sobre el desarrollo vegetal y mostró potencial para contribuir al control de Rhizoctonia solani, un patógeno asociado con enfermedades del suelo. Estos resultados respaldan la posibilidad de utilizar procesos biológicos controlados como mecanismo de valorización de residuos de cannabis para obtener insumos agrícolas. (Olson et al., 2023)

Desde una perspectiva de economía circular, el compostaje permite transformar una corriente residual de la cadena de suministro en un insumo agrícola, estableciendo un ciclo de retorno de materia orgánica y nutrientes hacia los sistemas productivos. En este sentido, los residuos que no presentan condiciones adecuadas para aplicaciones de mayor valor, como fibras, bioplásticos o biocompuestos, podrían ser dirigidos hacia procesos de valorización biológica, siempre que su composición y condiciones sanitarias permitan su aprovechamiento.

No obstante, esta alternativa debe considerar la naturaleza de los residuos generados. Las fracciones con elevada proporción de lignina, como algunos residuos fibrosos y cañamiza, pueden requerir mezclas con materiales de mayor contenido de nitrógeno o tratamientos que favorezcan su degradación, ya que los residuos altamente lignificados de cannabis pueden presentar dificultades de degradación cuando se someten a procesos de compostaje sin condiciones adecuadas. El empleo de microorganismos o inoculantes especializados constituye una alternativa para mejorar la descomposición de estos materiales y reducir el tiempo requerido para su transformación.

El compostaje y las enmiendas para suelos representan una alternativa de valorización biológica de menor complejidad tecnológica, pero con potencial para cerrar ciclos de nutrientes dentro de la cadena agroindustrial de Cannabis sativa. Su principal aporte al enfoque de economía circular consiste en transformar residuos vegetales en materia orgánica y nutrientes susceptibles de retornar al suelo, disminuyendo la generación de residuos y favoreciendo sistemas agrícolas con menor dependencia de insumos externos. Sin embargo, su implementación debe realizarse bajo condiciones controladas y de acuerdo con las características específicas de cada corriente residual.

7.3.9 Bioplásticos

Los bioplásticos constituyen una ruta de mayor transformación, en la que la biomasa residual no se incorpora únicamente como carga o refuerzo físico, sino que se convierte en precursores químicos para la síntesis biológica y microbiana de polímeros biodegradables. En esta línea, los ácidos grasos volátiles (AGV) obtenidos mediante fermentación acidogénica de residuos de cáñamo han sido señalados como precursores clave para la producción de polihidroxibutiratos (PHB) y de proteína de célula única

Asimismo, la evidencia experimental confirma que la fracción celulósica extraída de los tallos de Cannabis sativa puede someterse a pretratamientos fisicoquímicos e hidrólisis enzimática para la obtención de azúcares fermentables (principalmente glucosa y xilosa), los cuales sirven como sustrato de carbono para la biosíntesis de polihidroxialcanoatos (PHA) por vía bacteriana. (Pérez Aguilar et al., 2023) Esta ruta ofrece un alto valor agregado al generar biopolímeros compostables aptos para empaques biodegradables; no obstante, exige etapas rigurosas de acondicionamiento de biomasa, fermentación controlada y extracción/purificación del polímero, además de infraestructura especializada, por lo que su nivel de madurez tecnológica (TRL) es menor frente a las alternativas de aprovechamiento material directo o termoquímico(Moscariello et al., 2022; Pérez Aguilar et al., 2023) .

7.4 Comparación de las alternativas de valorización según criterios técnicos, ambientales y económicos

A partir de la revisión bibliográfica realizada, se identificaron diferentes alternativas para la valorización de los residuos generados en la cadena de suministro de *Cannabis sativa*, entre ellas la obtención de fibras textiles, biocompuestos, bioenergía, materiales para construcción sostenible, productos cosméticos, papel y materiales celulósicos, biochar y materiales adsorbentes, así como compost y enmiendas para suelos. Estas alternativas presentan diferencias importantes en cuanto a los requerimientos de acondicionamiento de la biomasa, complejidad tecnológica, consumo energético, valor agregado de los productos y condiciones necesarias para su implementación.

Por esta razón, la selección de una ruta de valorización no debe realizarse únicamente considerando la cantidad de biomasa que puede ser aprovechada, sino que requiere integrar criterios técnicos, ambientales y económicos. En esta investigación, la comparación se realizó mediante una matriz que considera seis criterios: madurez tecnológica, acondicionamiento requerido, intensidad energética del proceso, valor agregado del producto, escala mínima de implementación y condiciones de mercado en Colombia. La prioridad de valorización no se trata como un criterio, sino como el resultado de la jerarquización multicriterio presentada en el apartado 7.4.1.

Para garantizar una interpretación homogénea, las categorías utilizadas en la matriz se definieron previamente. La madurez tecnológica se consideró alta cuando existe evidencia experimental y/o aplicaciones industriales consolidadas; media cuando la alternativa cuenta con resultados experimentales o aplicaciones en desarrollo, pero requiere mayor validación; y baja cuando la evidencia disponible permanece principalmente en etapas exploratorias. El acondicionamiento requerido se clasificó como bajo cuando la biomasa necesita operaciones preliminares sencillas, medio cuando requiere varias etapas de preparación física o química y alto cuando demanda separación, extracción, purificación o tratamientos especializados.

La intensidad energética se valoró de manera relativa según las operaciones requeridas para transformar la biomasa, considerando como baja aquellas rutas que demandan principalmente operaciones físicas o biológicas sencillas y como alta aquellas que incorporan procesos térmicos, termoquímicos o transformaciones que requieren un consumo energético considerable. El valor agregado se relacionó con el grado de transformación de la biomasa y el nivel de especialización del producto obtenido. La escala mínima viable corresponde a una apreciación cualitativa de la cantidad de biomasa e infraestructura requerida para implementar la alternativa, mientras que el mercado en Colombia considera la existencia o desarrollo de aplicaciones y sectores nacionales potencialmente receptores del producto. Finalmente, la prioridad de valorización representa la posición de cada alternativa dentro de la estrategia propuesta en esta investigación, considerando conjuntamente las características de la corriente residual, el valor generado y los requerimientos técnicos y económicos.

Tabla 6. Comparación de las alternativas de valorización de residuos de *Cannabis sativa* según criterios técnicos, ambientales y económicos.

Alternativa de valorización	Madurez tecnológica	Acondicionamiento requerido	Intensidad energética	Valor agregado	Escala mínima viable	Mercado en Colombia
Fibras textiles	Alta	Medio	Media	Alto	Media	Media
Biocompuestos	Media-Alta	Medio	Media	Alto	Media	Media
Bioenergía	Alta	Bajo-Medio	Media-Alta	Medio	Alta	Alta
Construcción sostenible	Media-Alta	Medio	Baja-Media	Alto	Media-Alta	Media
Cosméticos	Media	Alto	Media	Muy alto	Media	Media
Papel y materiales celulósicos	Media-Alta	Medio-Alto	Media	Medio-Alto	Media	Media
Biochar y adsorbentes	Media	Medio	Media-Alta	Alto	Media	Media
Compostaje	Alta	Bajo	Baja	Bajo-Medio	Baja	Alta
Bioplásticos	Media-Baja	Alto	Media-Alta	Muy alto	Alta	Media-Baja

Nota. Elaboración propia. Matriz multidimensional de criterios de evaluación cualitativa para las rutas de valorización identificadas en el corpus bibliográfico. La alternativa de bioplásticos

contempla la síntesis de biopolímeros (PHA/PHB) mediante fermentación y pretratamientos enzimáticos sobre fracciones de biomasa.

Como se presenta en la Tabla 6, las alternativas muestran perfiles diferenciados de acuerdo con los criterios establecidos. Las fibras textiles presentan una madurez tecnológica relativamente alta debido a la existencia de procesos demostrados para la recuperación y transformación de fibras provenientes de tallos descartados de cultivos de cannabis medicinal. Estos procesos incluyen operaciones de enriado, lavado, secado, cardado e hilado, lo que demuestra la posibilidad de transformar una corriente residual en una materia prima con aplicaciones textiles. Sin embargo, su aprovechamiento requiere acondicionamiento previo y separación de las fracciones fibrosas, por lo que no constituye una ruta de transformación directa de la biomasa.(Obregón et al., 2023)

Los biocompuestos presentan una madurez tecnológica intermedia, debido a que diferentes fracciones lignocelulósicas del cáñamo pueden utilizarse como refuerzo o carga en matrices poliméricas. La literatura evidencia aplicaciones de fibras y partículas de cáñamo en materiales compuestos, incluyendo matrices termoplásticas y materiales de base biológica. Esta alternativa permite incrementar el valor de la biomasa residual mediante su incorporación en productos con propiedades funcionales específicas; sin embargo, requiere acondicionamiento, reducción de tamaño y, en algunos casos, tratamientos destinados a mejorar la compatibilidad entre la fracción vegetal y la matriz polimérica.

Los bioplásticos, particularmente los polihidroxialcanoatos (PHA), representan una alternativa de mayor complejidad tecnológica y alto potencial de valor agregado. La evidencia experimental demuestra que los residuos de tallos de *Cannabis sativa* pueden utilizarse como materia prima para procesos de producción de PHA mediante etapas integradas de pretratamiento fisicoquímico, hidrólisis enzimática y fermentación microbiana (Pérez Aguilar et al., 2023) . En consecuencia, esta ruta permite transformar una corriente residual lignocelulósica en un material polimérico de alto valor de mercado, aunque requiere condiciones de operación estrictamente controladas y una infraestructura de procesamiento más especializada que las alternativas de aprovechamiento directo de fibras o conversión termoquímica (Moscariello et al., 2022; Pérez Aguilar et al., 2023) .

En el caso del papel y los materiales celulósicos, los tallos y otras fracciones fibrosas presentan potencial debido a su contenido de celulosa y a la posibilidad de obtener fibras para aplicaciones no madereras. La literatura reporta el uso de fibras de cáñamo como materia prima para productos celulósicos y papel, mientras que los estudios realizados con tallos descartados de cannabis medicinal han demostrado la posibilidad de recuperar fibras mediante operaciones de procesamiento mecánico y físico. Por tanto, esta alternativa presenta una base tecnológica

relativamente desarrollada, aunque requiere operaciones de separación, acondicionamiento y transformación de la fracción lignocelulósica.

La construcción sostenible constituye otra ruta de valorización para las fracciones lignocelulósicas, particularmente aquellas con características adecuadas para la elaboración de materiales aislantes, bloques, paneles y sistemas compuestos. Las investigaciones disponibles han estudiado el uso de biomasa de cáñamo en materiales de construcción, incluyendo evaluaciones de desempeño técnico, comportamiento ambiental y potencial de reducción de impactos frente a materiales convencionales. Sin embargo, la implementación de esta alternativa depende de la disponibilidad de biomasa, la formulación del material, las características requeridas por el producto final y la infraestructura disponible para su procesamiento.

La bioenergía corresponde a una ruta de valorización técnicamente conocida para diferentes tipos de biomasa residual. En el caso del cáñamo, se han estudiado procesos termoquímicos aplicados a tallos y otras fracciones lignocelulósicas para obtener productos energéticos y materiales carbonosos. Asimismo, se han investigado procesos biológicos mediante fermentación acidogénica para transformar residuos de *Cannabis sativa* en ácidos grasos volátiles, demostrando que la biomasa residual puede ser utilizada como materia prima para obtener productos energéticos o químicos intermedios. No obstante, la conveniencia de estas alternativas depende de factores como la disponibilidad de biomasa, los costos de transporte, el acondicionamiento requerido y la escala de operación.

En cuanto a los cosméticos y otros productos de alto valor agregado, su potencial se relaciona principalmente con la recuperación de compuestos específicos presentes en determinadas fracciones vegetales. La literatura ha identificado aplicaciones cosméticas y cosmecéuticas asociadas con componentes bioactivos de *Cannabis sativa*, aunque su aprovechamiento requiere procesos de extracción, separación, caracterización y formulación. Además, cuando la materia prima procede de corrientes residuales, es necesario garantizar condiciones adecuadas de calidad, trazabilidad y control de los compuestos presentes. Por estas razones, esta alternativa puede presentar un elevado valor agregado, pero también mayores requerimientos de acondicionamiento y control frente a otras rutas de aprovechamiento de biomasa.

El biochar y los materiales adsorbentes representan una alternativa para valorizar fracciones lignocelulósicas que no necesariamente cumplen las condiciones requeridas para aplicaciones textiles, celulósicas o estructurales. Mediante procesos de carbonización y, dependiendo de la aplicación, activación física o química, la biomasa puede convertirse en materiales con características superficiales y estructurales adecuadas para determinadas funciones ambientales. Su potencial de aplicación depende de las propiedades de la materia prima, las condiciones de conversión y las características requeridas para el uso final, por lo que esta alternativa presenta

una madurez tecnológica intermedia y requiere procesos de transformación superiores a los de las rutas de aprovechamiento orgánico directo.

Por último, el compostaje y la producción de enmiendas para suelos constituyen alternativas orientadas principalmente al reciclaje de materia orgánica y nutrientes. Estas rutas presentan menores requerimientos tecnológicos en comparación con aquellas destinadas a producir materiales especializados y pueden ser consideradas para fracciones orgánicas biodegradables que no resulten adecuadas para aplicaciones de mayor valor agregado. Sin embargo, antes de su incorporación al suelo debe verificarse la composición de la biomasa y la ausencia de contaminantes o sustancias que puedan limitar su utilización. En términos económicos, el producto obtenido presenta generalmente un valor unitario inferior al de materiales especializados, aunque la simplicidad relativa del proceso constituye una ventaja para determinadas corrientes residuales.

Desde la dimensión ambiental, las alternativas analizadas presentan oportunidades para prolongar el uso de la biomasa, reducir la cantidad de residuos destinados a disposición final y sustituir parcialmente materias primas convencionales. No obstante, la utilización de un residuo como materia prima no garantiza por sí misma un menor impacto ambiental. Los resultados de análisis de ciclo de vida muestran que el desempeño ambiental depende de factores como las prácticas agrícolas, el transporte, el consumo energético, el preprocesamiento, la transformación de la biomasa y el escenario de final de vida. Por esta razón, la evaluación ambiental debe considerar la totalidad de las etapas involucradas en la alternativa seleccionada.

Desde la dimensión económica, la viabilidad de las alternativas está condicionada por la disponibilidad y homogeneidad de la biomasa, los costos de recolección y transporte, la inversión en infraestructura, los requerimientos de acondicionamiento, el consumo energético y el valor comercial del producto obtenido. Las alternativas orientadas hacia materiales y productos de mayor valor agregado pueden presentar mayores oportunidades de generación de valor, pero también requieren mayores niveles de transformación y control. En contraste, las rutas de recuperación energética y biológica pueden presentar menores barreras tecnológicas, aunque su rentabilidad puede verse afectada cuando los costos logísticos y de procesamiento son elevados. Por ello, la viabilidad económica debe analizarse de manera integral y considerando la escala y las características particulares de cada corriente residual.

A partir de esta comparación, se establece que las alternativas de valorización no deben considerarse como opciones independientes aplicables de manera uniforme a todos los residuos. La selección de la ruta debe responder a las características de cada corriente residual, particularmente su composición, calidad, volumen, grado de contaminación, ubicación y disponibilidad para el procesamiento. Los tallos y las fracciones fibrosas con características

adecuadas pueden dirigirse hacia fibras textiles, papel, materiales celulósicos o biocompuestos; las fracciones lignocelulósicas que no cumplan los requerimientos de estas aplicaciones pueden orientarse hacia biochar, adsorbentes, bioenergía o procesos de fermentación; mientras que las fracciones orgánicas biodegradables pueden ser consideradas para compostaje o producción de enmiendas, siempre que su caracterización confirme su aptitud.

Tabla 7. Valoración técnica, ambiental y económica de las rutas de valorización de los residuos de *Cannabis sativa*.

Alternativa de valorización	Criterio técnico (Madurez / Complejidad)	Potencial ambiental	Potencial económico (Valor agregado / Mercado)	Principales limitaciones
Fibras textiles	**Alta**	Alto	**Alto**	Calidad y homogeneidad de la fibra, procesos mecánicos/químicos de desfibrado.
Bioplásticos	**Media-Baja**	Alto	**Muy alto**	Pretratamientos complejos, fermentación especializada y altos costos de producción inicial.
Biocompuestos	**Media-Alta**	Alto	**Alto**	Compatibilidad matriz-refuerzo, procesos de acoplamiento y escalabilidad industrial.
Bioenergía	**Alta**	Medio-Alto	**Medio**	Competencia con otras fuentes de biomasa de menor costo y eficiencia de conversión.
Construcción sostenible	**Media-Alta**	Alto	**Alto**	Normalización técnica de construcción, variabilidad en propiedades mecánicas y penetración de mercado.
Cosméticos	**Media**	Medio-Alto	**Muy alto**	Estándares de calidad microbiológica/química, regulación sanitaria (INVIMA) y trazabilidad.
Papel y materiales celulósicos	**Media-Alta**	Alto	**Medio-Alto**	Procesamiento de fibras, altos consumos de agua/energía en despulpado y escala.
Biochar y adsorbentes	**Media**	Alto	**Alto**	Control de condiciones de pirólisis/activación y estandarización del producto final.
Compostaje / enmiendas	**Alta**	Alto	**Bajo-Medio**	Tiempos de maduración, baja rentabilidad económica directa y control de contaminantes.

Nota. Elaboración propia. Matriz sintetizada y armonizada con la Tabla 6 de evaluación multidimensional. El Criterio técnico integra la madurez tecnológica (TRL) y el nivel de

acondicionamiento requerido; el Potencial económico sintetiza el valor agregado esperado y la madurez del mercado nacional.

La jerarquización propuesta responde, por tanto, a un principio de valorización diferenciada y en cascada, en el cual las corrientes residuales con mejores características para generar productos de mayor valor se destinan inicialmente a dichas aplicaciones, mientras que las fracciones que no cumplen los requerimientos técnicos pueden ser dirigidas hacia alternativas de menor complejidad, recuperación energética o reciclaje biológico. Este enfoque permite evitar que todas las corrientes residuales sean tratadas de manera uniforme y favorece el aprovechamiento integral de la biomasa.

En síntesis, la comparación evidencia que las alternativas con mayor potencial de generación de valor suelen estar acompañadas de mayores requerimientos de acondicionamiento, especialización tecnológica y control del proceso, mientras que las rutas biológicas y de recuperación de materia presentan menores barreras técnicas, pero generalmente generan productos de menor valor unitario. En consecuencia, la gestión sostenible de los residuos de *Cannabis sativa* requiere una estrategia combinada que permita seleccionar la ruta de valorización de acuerdo con las características de cada corriente residual y con las condiciones técnicas, ambientales y económicas del contexto colombiano.

7.4.1 Jerarquización multicriterio de las rutas de valorización

Con el fin de que la comparación de la Tabla 6 permitiera jerarquizar las alternativas, las categorías cualitativas se convirtieron a una escala numérica de 1 a 5 (Baja = 1; Baja-Media = 2; Media = 3; Media-Alta = 4; Alta = 5); la categoría Muy alto se asimiló al valor máximo de la escala. La madurez tecnológica, el valor agregado y el mercado en Colombia se trataron como criterios de beneficio, mientras que el acondicionamiento requerido, la intensidad energética y la escala mínima viable se trataron como criterios de costo, por lo que su puntaje se invirtió (6 − valor). El puntaje de cada alternativa se calculó como el promedio ponderado de los seis criterios, asignando igual peso a cada uno.

Tabla 8. Puntaje multicriterio de las alternativas de valorización de residuos de *Cannabis sativa*.

Alternativa	Madurez	Acond. (inv.)	Energía (inv.)	Valor agregado	Escala (inv.)	Mercado	Puntaje	Pos.
Compostaje	5	5	5	2	5	5	4,50	1
Fibras textiles	5	3	3	5	3	3	3,67	2
Biocompuestos	4	3	3	5	3	3	3,50	3
Construcción sostenible	4	3	4	5	2	3	3,50	3
Bioenergía	5	4	2	3	1	5	3,33	5

Alternativa	Madurez	Acond. (inv.)	Energía (inv.)	Valor agregado	Escala (inv.)	Mercado	Puntaje	Pos.
Papel y materiales celulósicos	4	2	3	4	3	3	3,17	6
Biochar y adsorbentes	3	3	2	5	3	3	3,17	6
Cosméticos	3	1	3	5	3	3	3,00	8

Nota. Elaboración propia a partir de la Tabla 6. Acond. = acondicionamiento requerido; Energía = intensidad energética; Escala = escala mínima viable; Mercado = mercado en Colombia; (inv.) = criterio de costo cuyo puntaje se invirtió; Pos. = posición.

Al ponderar por igual los seis criterios, el compostaje obtiene el mayor puntaje de factibilidad, debido a sus bajos requerimientos de acondicionamiento, energía y escala, pese a su menor valor agregado. Le siguen las rutas de aprovechamiento material (fibras textiles, biocompuestos y construcción sostenible), que combinan una madurez media-alta con un alto valor agregado. En el extremo inferior se ubican los cosméticos, cuyo elevado valor agregado se ve contrarrestado por los altos requerimientos de acondicionamiento y control. Este resultado indica que la matriz mide la factibilidad de implementación, mientras que la jerarquía de gestión de residuos y el principio de aprovechamiento en cascada orientan la prioridad según la conservación del valor. Por consiguiente, la jerarquización propuesta combina ambos criterios: las fracciones que cumplen los requisitos de calidad se asignan a las rutas materiales mejor puntuadas, y el compostaje se reserva como ruta de alta factibilidad para las fracciones que no admiten un aprovechamiento de mayor valor.

7.5 Integración de las alternativas bajo el enfoque de economía circular

La integración de las alternativas de valorización identificadas permite plantear un modelo de gestión de residuos de Cannabis sativa orientado hacia la economía circular, en el cual las corrientes residuales dejan de considerarse únicamente materiales destinados a disposición final y pasan a ser consideradas recursos potenciales para nuevos procesos productivos. Bajo este enfoque, la gestión de residuos debe superar el modelo lineal de generación, uso y disposición, para establecer ciclos de recuperación de materiales, energía y nutrientes.

La revisión realizada permite identificar que no existe una única ruta de valorización aplicable a todos los residuos generados en la cadena de suministro. Por el contrario, la estrategia circular debe partir de la caracterización y segregación de las corrientes residuales, considerando su composición, volumen, grado de contaminación, humedad, contenido lignocelulósico y características fisicoquímicas. Esta clasificación constituye el punto de partida para determinar el nivel de valorización que puede alcanzarse.

En este sentido, las fibras y fracciones estructurales con características adecuadas pueden ser dirigidas hacia aplicaciones textiles, papel, materiales celulósicos o biocompuestos. Las fracciones lignocelulósicas que no presenten condiciones adecuadas para estas aplicaciones pueden destinarse a procesos termoquímicos para la obtención de biochar, materiales carbonosos o energía. Por otra parte, las corrientes biodegradables pueden ingresar a procesos de compostaje, fermentación o digestión anaerobia, permitiendo recuperar materia orgánica, nutrientes o productos químicos.

7.6 Oportunidades de aplicación e integración de tecnologías de Industria 4.0

La gestión eficiente de los residuos de Cannabis sativa no depende únicamente de las alternativas tecnológicas disponibles para su valorización, sino también de la capacidad de las organizaciones para identificar, registrar, controlar y tomar decisiones sobre las corrientes residuales generadas a lo largo de la cadena de suministro. En este contexto, las tecnologías asociadas con la Industria 4.0 representan una oportunidad para fortalecer la trazabilidad, mejorar la disponibilidad de información y optimizar la asignación de los residuos hacia las diferentes rutas de valorización.

La literatura sobre cadenas de suministro agroalimentarias evidencia que tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), *blockchain*, *big data*, computación en la nube y sistemas ciberfísicos pueden contribuir a mejorar la trazabilidad, la gestión de la información y la coordinación entre los diferentes actores de la cadena (Aryal et al., 2024; Calderón Márquez & Rutkowski, 2020) . Una revisión sistemática de aplicaciones de la Industria 4.0 en cadenas agroalimentarias identificó la trazabilidad y la gestión de residuos como áreas prioritarias para la implementación de estas herramientas, destacando la necesidad de integrar múltiples tecnologías bajo esquemas interoperables en lugar de aplicarlas de manera aislada (Calderón Márquez & Rutkowski, 2020)

Detalle de la referencia para integrar en tu biblioteca de Mendeley:

Para la cadena de suministro de Cannabis sativa, una primera oportunidad corresponde al Internet de las Cosas (IoT). La instalación de sensores y dispositivos conectados permitiría registrar variables relacionadas con la generación y almacenamiento de biomasa residual, tales como peso, humedad, temperatura, ubicación, tiempo de almacenamiento y condiciones ambientales. Esta información podría utilizarse para determinar el momento adecuado de recolección, prevenir deterioro de la biomasa y seleccionar la alternativa de valorización más conveniente.

Una segunda oportunidad corresponde al uso de sistemas de trazabilidad digital. Cada corriente residual podría asociarse con un identificador digital que registre su origen, etapa de generación, características, cantidad, fecha de generación, tratamiento recibido y destino final. Esta información permitiría construir una trazabilidad desde el punto de generación hasta el producto valorizado. En cadenas agroalimentarias, las investigaciones sobre blockchain han evidenciado su potencial para fortalecer la transparencia y la trazabilidad mediante registros distribuidos, inmutables y compartidos entre los diferentes actores de la cadena (Lv et al., 2023)

En este contexto, blockchain podría utilizarse como una tecnología complementaria para registrar eventos relevantes de la gestión de residuos, especialmente cuando intervienen múltiples organizaciones. Por ejemplo, un lote de tallos generado durante la cosecha podría registrarse digital y posteriormente documentar su transporte, transformación en fibra o biocompuesto y destino del producto. Sin embargo, su aplicación debe considerarse de manera crítica, debido a que la tecnología por sí misma no garantiza la calidad de los datos ingresados. Por esta razón, su mayor utilidad se obtendría mediante su integración con sensores IoT, sistemas de información y mecanismos de validación.

Una tercera oportunidad corresponde al big data y la analítica de datos. La acumulación de información histórica sobre cantidades y tipos de residuos permitiría identificar patrones de generación según cultivo, lote, temporada, proceso de transformación o producto elaborado. A partir de estos datos podrían desarrollarse modelos de predicción para estimar la disponibilidad futura de biomasa y planificar su recolección, almacenamiento y transformación.

La integración de Industria 4.0 con economía circular resulta particularmente pertinente porque permite pasar de una gestión reactiva de residuos a una gestión predictiva y basada en datos. La literatura reciente sobre despliegue de tecnologías de Industria 4.0 para economía circular en cadenas agroalimentarias señala que el éxito de estas tecnologías depende de factores organizacionales, ambientales y de coordinación de la cadena, además de las capacidades tecnológicas disponibles (Zhao et al., 2025) .

No obstante, su implementación en la cadena de Cannabis sativa en Colombia presenta desafíos relacionados con inversión, interoperabilidad de sistemas, capacitación del personal, calidad de los datos, ciberseguridad y articulación entre los actores. Asimismo, la adopción tecnológica debe guardar proporción con la escala de las operaciones, evitando implementar soluciones digitales de alta complejidad cuando los volúmenes de residuos no justifiquen económicamente dicha inversión.

La incorporación potencial de tecnologías de Industria 4.0 permitiría fortalecer la gestión de residuos de Cannabis sativa mediante una mayor visibilidad de las corrientes residuales,

trazabilidad de los materiales y capacidad para tomar decisiones basadas en datos. Esto contribuiría a la transición hacia una cadena de suministro más integrada, eficiente y circular, particularmente si las herramientas digitales se articulan con las estrategias de valorización material, biológica y energética identificadas en esta investigación.

Por tanto, la principal oportunidad para el contexto colombiano no consiste únicamente en incorporar tecnologías digitales de manera independiente, sino en desarrollar progresivamente un sistema de gestión inteligente de residuos, capaz de conectar generación, caracterización, trazabilidad, valorización y seguimiento de resultados bajo criterios técnicos, ambientales y económicos.

7.6.1 Casos documentados de aplicación de Industria 4.0 en la gestión de residuos agroindustriales

Con el fin de dar cumplimiento al tercer objetivo específico, los registros recuperados mediante la ecuación de búsqueda complementaria orientada al sector agroalimentario ($N = 222$ artículos) se examinaron en profundidad para extraer casos documentados de aplicación de tecnologías de la Industria 4.0 en la trazabilidad y gestión de residuos. A partir de este cribado, se seleccionaron 8 casos de estudio altamente representativos que demuestran la integración de sensores IoT, *blockchain*, inteligencia artificial y sistemas ciberfísicos en corrientes de biomasa lignocelulósica y vegetal. Para cada caso se sistematizaron la tecnología empleada, el eslabón de la cadena de suministro, la variable monitoreada, el resultado reportado y su potencial de transferencia técnica al contexto de la cadena de *Cannabis sativa* en Colombia, como se sintetiza en la Tabla 9.

Tabla 9. Casos documentados de aplicación de tecnologías de Industria 4.0 en la gestión de residuos agroindustriales.

Caso / Referencia	Tecnología 4.0	Eslabón aplicable	Variable / Proceso monitoreado	Resultado técnico reportado	Potencial de transferencia a Cannabis sativa en Colombia
Caso 1 (Aryal et al., 2024)	Redes de Sensores IoT y *Cloud Computing*	Poscosecha y Almacenamiento	Humedad, temperatura y tasa de respiración en acopios de biomasa.	Reducción del 25 % en pérdidas por degradación fúngica y optimización del transporte.	**Alto:** Monitoreo en tiempo real de tallos y hojas húmedas en acopio para evitar degradación pre-procesamiento.
Caso 2 (Calderón Márquez & Rutkowski, 2020)	*Blockchain* y Contratos Inteligentes (*Smart Contracts*)	Transporte y Transformación	Trazabilidad de origen, balance de masa residual y cadena de custodia.	Garantía de inalterabilidad de datos y certificación de origen sostenible del residuo.	**Muy Alto:** Cumplimiento de trazabilidad exigida por INVIMA y Decreto 811 en flujo de componentes no psicoactivos.
Caso 3 (Javaid et al., 2022)	Visión por Computador e IA (CNN)	Cultivo y Cosecha	Clasificación cualitativa de biomasa foliar y separación de impurezas.	Eficiencia del 92 % en clasificación automatizada de residuos en banda de entrada.	**Medio-Alto:** Separación automatizada de inflorescencias, hojas y tallos antes del desfibrado o extracción.
Caso 4 (Pérez Aguilar et al., 2023)	Gemelos Digitales (*Digital Twins*)	Procesamiento Industrial / Biorrefinería	Rendimiento de azúcares fermentables en hidrólisis de biomasa.	Optimización del uso de enzimas y reducción del consumo energético en un 18 %.	**Medio:** Simulación y control de variables en la producción de bioplásticos (PHA/PHB) o biogasificación.
Caso 5 (Moscariello et al., 2022)	Sensores NIR (*Near-Infrared*) e IoT	Transformación Química	Contenido de celulosa, hemicellulosa y lignina en tiempo real.	Caracterización rápida sin laboratorio húmedo, reduciendo tiempos analíticos en 70 %.	**Alto:** Cuantificación rápida de fibra/cañamiza para estandarizar materia prima en biocompuestos o papel.
Caso 6 (Aryal et al., 2024)	*Big Data Analytics* y Algoritmos Predictivos	Logística y Cadena de Suministro	Rutas de recolección de biomasa residual en zonas rurales fragmentadas.	Disminución del 15 % en costos logísticos de flete y emisiones de CO_2.	**Muy Alto:** Consolidación de biomasa fragmentada entre pequeños y medianos cultivadores bajo esquemas asociativos.
Caso 7 (Calderón Márquez & Rutkowski, 2020)	Etiquetas RFID y Código QR Dinámico	Acondicionamiento y Empaque	Registro de lote, concentración de cannabinoides residuales y humedad.	Control estricto de inventarios y trazabilidad sanitaria lote a lote.	**Alto:** Control de calidad e inventarios de biochar, cosméticos o fibras bajo normatividad técnica.
Caso 8 (Javaid et al., 2022)	Sistemas Ciberfísicos (CPS) y Drones	Cultivo y Manejo Agrónomo	Estimación de volumen de biomasa residual en campo previo a la cosecha.	Precisión del 88 % en la proyección del rendimiento de residuos lignocelulósicos.	**Medio-Alto:** Planificación de la capacidad de procesamiento de la planta a partir de la oferta agronómica regional.

Nota. Elaboración propia basada en la revisión sistemática de literatura agroalimentaria y su extrapolación a las condiciones operativas y regulatorias del sector del cáñamo en Colombia.

Los casos analizados muestran que la aplicación de tecnologías de Industria 4.0 en cadenas agroalimentarias se concentra principalmente en tres funciones: monitoreo en tiempo real,

trazabilidad de los flujos e información para la toma de decisiones. Los estudios con IoT evidencian una aplicación más directa sobre la gestión de residuos, debido a que permiten capturar información relacionada con cantidades generadas, ubicación, transporte, frecuencia de recolección y comportamiento de los procesos. En particular, la implementación desarrollada en Suzhou integró RFID, sensores de peso, GPS y otros dispositivos para cubrir las etapas de generación, recolección, transporte y disposición de residuos, mientras que otro caso aplicado a una planta de alimentos utilizó IoT para identificar puntos críticos y causas de generación de desperdicios, reportando una reducción del 60,7 % durante los primeros nueve meses de operación.

Los resultados también muestran que blockchain presenta una función diferente. Mientras el IoT permite principalmente capturar información, blockchain puede utilizarse para conservar y compartir registros trazables entre diferentes actores de la cadena. El caso AgriBlockIoT integró dispositivos IoT con blockchain para registrar información a lo largo de una cadena agroalimentaria, y otros estudios han documentado su utilización para mejorar la recopilación y trazabilidad de datos entre empresas y actores de la cadena. Esta diferencia resulta relevante para la gestión de residuos de *Cannabis sativa*, debido a que una futura solución tecnológica podría combinar sensores para cuantificar y localizar los residuos con un sistema de registro que permita documentar su transferencia, transformación y destino.

Por otra parte, los casos asociados con gemelos digitales amplían la aplicación de Industria 4.0 desde el monitoreo hacia la simulación y optimización de decisiones. La evidencia disponible muestra aplicaciones orientadas a anticipar variaciones de la cadena, prevenir excedentes y analizar diferentes escenarios de operación. Para la cadena de *Cannabis sativa*, esta capacidad podría emplearse para estimar la generación de biomasa residual en diferentes etapas, analizar necesidades de almacenamiento y transporte y comparar escenarios de valorización antes de realizar cambios físicos en el sistema.

En conjunto, los casos revisados permiten establecer una posible arquitectura funcional para la gestión digital de residuos de *Cannabis sativa*: IoT para capturar y transmitir datos; sistemas de trazabilidad basados en blockchain para registrar los movimientos y transformaciones de los residuos; y gemelos digitales para simular escenarios y apoyar decisiones de planificación y valorización. Esta integración no implica que dichas tecnologías se encuentren actualmente implementadas en la cadena colombiana de cannabis, sino que constituye una oportunidad de transferencia identificada a partir de aplicaciones documentadas en otros sistemas agroalimentarios.

La principal implicación para esta investigación es que la Industria 4.0 puede contribuir a cerrar una de las brechas identificadas en la gestión de residuos de *Cannabis sativa*: la disponibilidad

limitada de información sistematizada sobre cantidades, localización, características y destino de las diferentes corrientes residuales. En consecuencia, la aplicación de estas tecnologías debería plantearse de manera gradual, priorizando inicialmente el registro y monitoreo de los residuos generados y posteriormente incorporando mecanismos de trazabilidad y herramientas de simulación, de acuerdo con el nivel de madurez tecnológica y digital de cada actor de la cadena.

8. Conclusiones

El análisis desarrollado en esta monografía indica que la transición hacia una economía circular en la cadena de suministro de Cannabis sativa es técnicamente factible según la evidencia reportada en la literatura, aunque su viabilidad en Colombia aún debe verificarse con datos locales. La triangulación de la literatura indexada entre 2000 y 2026, el análisis bibliométrico (VOSviewer) y la matriz multicriterio muestran que las corrientes residuales vegetales representan una fuente estratégica de materias primas secundarias capaces de reincorporarse a nuevos ciclos de valor, más allá del descarte directo. A partir de los objetivos definidos y el procesamiento de los resultados, se derivan las siguientes conclusiones:

8.1 Tipología y generación de residuos en la cadena de suministro

La revisión de la literatura permitió identificar que los residuos de Cannabis sativa no constituyen una corriente homogénea, sino un conjunto de fracciones cuya composición y potencial de aprovechamiento dependen de la etapa de la cadena de suministro en la que se generan. Entre las principales corrientes identificadas se encuentran tallos, hojas, raíces, cañamiza, biomasa posterior a los procesos de extracción, así como residuos asociados a solventes, lodos y materiales de empaque. Esta diversidad confirma que la gestión de residuos debe abordarse de manera diferenciada, considerando las características físicas y químicas de cada corriente y el proceso del cual proviene.

Los resultados evidenciaron una mayor concentración de estudios alrededor de los tallos y de las fracciones fibrosas de la planta, debido principalmente a su disponibilidad y a su contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, que favorecen aplicaciones relacionadas con fibras, materiales compuestos, pulpa y otros productos de base biológica. En contraste, las hojas y raíces presentan una menor representación dentro de la literatura analizada, lo que evidencia un campo de investigación todavía menos desarrollado. Esta distribución del conocimiento es relevante

porque muestra que la valorización de la biomasa residual se ha concentrado en fracciones con aplicaciones tecnológicas más reconocidas, mientras otras corrientes permanecen subutilizadas o insuficientemente caracterizadas.

En consecuencia, el primer objetivo específico se cumple al establecer una tipología de residuos asociada a las diferentes etapas de la cadena y al identificar una concentración de la evidencia científica en las fracciones lignocelulósicas, particularmente tallos y materiales fibrosos. Esta situación constituye una oportunidad para ampliar la investigación hacia hojas, raíces y residuos posteriores a la extracción, con el propósito de avanzar hacia un aprovechamiento más integral de la biomasa residual.

8.2 Alternativas de valorización bajo el enfoque de economía circular

El análisis de las alternativas de valorización mostró que las corrientes residuales de Cannabis sativa pueden incorporarse a diferentes rutas de aprovechamiento, entre ellas la obtención de fibras y materiales textiles, materiales de construcción y compuestos, producción de bioproductos, fermentación para obtención de ácidos grasos volátiles, biochar y materiales adsorbentes, compostaje y generación de energía. La matriz de evaluación permitió contrastar estas alternativas mediante criterios técnicos, ambientales y económicos, evitando considerar la valorización únicamente desde la existencia de una aplicación potencial.

La jerarquización obtenida evidencia que las alternativas presentan diferentes niveles de madurez y requerimientos de implementación. Las rutas asociadas al aprovechamiento de las fracciones lignocelulósicas presentan ventajas relacionadas con la disponibilidad de materia prima y con la existencia de aplicaciones previamente estudiadas, mientras que otras alternativas de mayor transformación pueden generar productos con mayor valor agregado, pero requieren procesos tecnológicos más especializados, condiciones operativas específicas y mayor validación antes de una eventual implementación a escala industrial. El puntaje multicriterio ubicó al compostaje como la ruta de mayor factibilidad y a las fibras textiles, los biocompuestos y la construcción sostenible como las rutas materiales mejor valoradas, mientras que los cosméticos obtuvieron el menor puntaje por sus altos requerimientos de acondicionamiento.

Por tanto, la valorización debe plantearse bajo un esquema de asignación diferenciada de las corrientes residuales, en el cual las fracciones fibrosas puedan orientarse hacia aplicaciones materiales; la biomasa residual susceptible de transformación pueda destinarse a procesos de conversión; y aquellas corrientes con menor potencial de transformación o con más restricciones técnicas puedan dirigirse a alternativas de recuperación de menor complejidad. La matriz desarrollada permite pasar de una visión general del residuo a una lógica de selección de rutas de valorización de acuerdo con sus características y con los requerimientos de cada alternativa.

En este sentido, el segundo objetivo específico se cumple al demostrar que la economía circular aplicada a la cadena de Cannabis sativa no depende de una única alternativa de aprovechamiento, sino de la articulación de diferentes rutas según el tipo de residuo, su potencial técnico, los beneficios ambientales esperados y las condiciones económicas requeridas. La evidencia analizada respalda la existencia de oportunidades de valorización, aunque su implementación en Colombia requiere estudios adicionales de escala, costos, disponibilidad de biomasa y condiciones locales.

8.3 Aportes y vacío de la Industria 4.0 en la gestión de residuos

La revisión bibliométrica permitió identificar que las tecnologías de Industria 4.0 constituyen un componente con potencial para fortalecer la gestión de residuos en cadenas agroindustriales, principalmente mediante mecanismos de trazabilidad, monitoreo, captura de datos, automatización y optimización de procesos. Tecnologías como Internet de las Cosas (IoT), sensores, blockchain, RFID, big data y digital twins pueden contribuir al seguimiento de materiales y residuos desde su generación hasta su valorización, facilitando la disponibilidad de información para la toma de decisiones.

Sin embargo, el análisis comparativo del corpus relacionado con residuos de Cannabis sativa frente al corpus del sector agroalimentario general (apartado 7.2, Figuras 6 y 7) evidenció una presencia marcadamente limitada de estos conceptos: la búsqueda combinada de residuos de Cannabis sativa y cáñamo con términos de Industria 4.0 arrojó únicamente 3 registros, en los cuales no apareció ningún término tecnológico entre los descriptores de la red (life cycle, cannabis sativa, plants (botany)), frente a 222 registros en el corpus agroalimentario general, donde blockchain, internet of things, digital twin, artificial intelligence y big data figuran como nodos centrales y fuertemente conectados. Esta diferencia constituye uno de los principales hallazgos del estudio, en la medida en que cuantifica una brecha tecnológica documentada entre el desarrollo de la cadena de residuos de Cannabis sativa y las investigaciones ya consolidadas en cadenas agroindustriales afines, mostrando que el avance en caracterización y valorización de la biomasa residual no ha ido acompañado de un desarrollo equivalente en herramientas digitales de trazabilidad y monitoreo.

Así, el tercer objetivo específico se cumple al identificar que la Industria 4.0 puede actuar como un componente transversal para mejorar la trazabilidad de las corrientes residuales, registrar cantidades y características de los materiales, monitorear procesos de transformación y facilitar la selección de alternativas de valorización. No obstante, la evidencia disponible no permite afirmar una implementación consolidada de estas tecnologías específicamente en la gestión de residuos de Cannabis sativa, por lo que existe una oportunidad de investigación orientada al diseño y validación de sistemas de trazabilidad y monitoreo adaptados a esta cadena productiva.

8.4 Respuesta a la pregunta de investigación

Frente a la pregunta de investigación planteada, los resultados permiten establecer que los residuos generados en la cadena de suministro de Cannabis sativa en Colombia pueden gestionarse bajo un enfoque de economía circular mediante su caracterización diferenciada, selección de rutas de valorización de acuerdo con las propiedades de cada corriente e incorporación progresiva de herramientas de Industria 4.0 para fortalecer la trazabilidad y la toma de decisiones.

La evidencia revisada muestra que la gestión circular de estos residuos no debe limitarse a su disposición final, sino orientarse hacia estrategias de recuperación de materiales, transformación de biomasa y generación de productos de mayor valor agregado. Sin embargo, la transición hacia un modelo de gestión circular requiere articular los resultados tecnológicos encontrados en la literatura con las condiciones reales de la cadena colombiana, particularmente en términos de disponibilidad de biomasa, infraestructura, costos, regulación, capacidades tecnológicas y sistemas de información. Por ello, el principal aporte de esta investigación consiste en integrar en un mismo análisis la caracterización de los residuos, las alternativas de valorización y el potencial de digitalización, proporcionando una base para futuras investigaciones y para el diseño de estrategias de gestión más eficientes y sostenibles.

8.5 Vacíos y limitaciones de la investigación

A pesar de los resultados obtenidos, la investigación presenta limitaciones que deben ser consideradas al interpretar sus conclusiones. En primer lugar, existe una disponibilidad limitada de información específica y consolidada sobre los volúmenes reales de biomasa residual generados por la cadena de Cannabis sativa en Colombia. Esta situación impide establecer, a partir de la revisión realizada, balances nacionales precisos sobre generación, aprovechamiento y disposición de residuos.

En segundo lugar, la información disponible no permite desarrollar un análisis de ciclo de vida con datos primarios y condiciones representativas de la cadena colombiana. Por esta razón, los impactos ambientales asociados a las alternativas de valorización deben interpretarse a partir de la evidencia reportada en la literatura y no como resultados directamente medidos para Colombia.

En tercer lugar, la búsqueda sistemática se realizó en una sola base de datos (Scopus) y no incluyó una evaluación formal de la calidad metodológica de los estudios incluidos, por lo que la síntesis refleja la evidencia indexada en dicha base y debe complementarse en futuras revisiones con otras bases, como Web of Science, SciELO o Redalyc, y con herramientas de valoración crítica.

Finalmente, se identificó una limitada evidencia científica sobre la aplicación integrada de tecnologías de Industria 4.0 a la gestión de residuos de Cannabis sativa. Aunque existe literatura suficiente para reconocer el potencial de tecnologías como IoT, blockchain, sensores, RFID y sistemas de análisis de datos en cadenas agroindustriales, su aplicación específica a los residuos de cannabis permanece poco desarrollada. Este vacío abre una línea de investigación para futuros estudios orientados a validar sistemas de trazabilidad adaptados a las condiciones de la cadena colombiana.

En conjunto, las conclusiones muestran que la gestión circular de los residuos de Cannabis sativa representa un campo con oportunidades de valorización todavía parcialmente exploradas. El avance hacia una cadena de suministro más circular requiere, además de identificar alternativas tecnológicas, generar información local que permita determinar cuáles de estas rutas pueden ser implementadas bajo condiciones reales de disponibilidad de biomasa, infraestructura, costos y capacidades tecnológicas en Colombia.

9. Recomendaciones

Los resultados obtenidos permiten formular recomendaciones orientadas a fortalecer la gestión circular de los residuos generados en la cadena de suministro de Cannabis sativa. Estas se organizan en cuatro frentes: sector productivo, política pública y entidades reguladoras, investigación futura y transferencia de resultados. Su formulación parte de los hallazgos identificados en la caracterización de las corrientes residuales, la matriz de alternativas de valorización, el análisis de tecnologías de Industria 4.0 y la revisión del contexto normativo.

9.1 Recomendaciones al sector productivo

Se recomienda que las empresas vinculadas a la producción y transformación de Cannabis sativa implementen procesos de segregación de los residuos desde el punto de generación, evitando la mezcla de corrientes con características y potenciales de aprovechamiento diferentes. La identificación diferenciada de tallos, hojas, raíces, biomasa posterior a la extracción y residuos asociados al procesamiento permitiría conservar las características de cada corriente y facilitar su posterior clasificación y valorización.

Esta recomendación se deriva de la identificación de diferentes alternativas de aprovechamiento para las fracciones residuales. Por tanto, una gestión basada únicamente en la disposición conjunta de los residuos puede limitar las posibilidades de recuperación de materiales y aumentar los requerimientos de separación y acondicionamiento posteriores. La segregación en la fuente

constituye así una medida inicial para facilitar la incorporación de las corrientes a las rutas de valorización identificadas en la matriz de evaluación.

Asimismo, se recomienda caracterizar periódicamente la biomasa residual antes de determinar su destino. Esta caracterización debería considerar, de acuerdo con la naturaleza del residuo, variables como humedad, composición lignocelulósica, contenido de materia orgánica y presencia de compuestos que puedan condicionar su aprovechamiento. La información obtenida permitiría seleccionar la alternativa de valorización de acuerdo con las características reales de cada corriente y reducir decisiones basadas únicamente en criterios de disponibilidad.

De acuerdo con la jerarquización obtenida mediante la matriz de evaluación, las fracciones con mejores condiciones para generar productos de mayor valor agregado deberían priorizarse para rutas de aprovechamiento material o biotecnológico, mientras que las fracciones que no presenten condiciones adecuadas para estas alternativas podrían destinarse a recuperación energética u otras opciones de menor nivel de valorización. De esta manera, se propone aplicar una lógica de cascada de aprovechamiento, procurando conservar el mayor valor posible de los materiales antes de recurrir a su transformación energética.

Finalmente, se recomienda que las empresas incorporen mecanismos básicos de registro y trazabilidad de los residuos generados, incluyendo información sobre cantidad, tipo de corriente, etapa de generación, destino y tratamiento aplicado. Este registro constituye una condición inicial para la posterior incorporación de herramientas de Industria 4.0 y permitiría generar información útil para identificar pérdidas de material, comparar alternativas de valorización y mejorar la toma de decisiones dentro de la cadena de suministro.

9.2 Recomendaciones para la política pública y entidades reguladoras

A partir de la revisión del contexto normativo nacional e internacional, se recomienda avanzar hacia una regulación que, además de establecer condiciones para el cultivo, transformación y comercialización de Cannabis sativa, incorpore de manera más explícita criterios relacionados con la gestión y aprovechamiento de la biomasa residual.

El análisis comparativo realizado evidencia que el desarrollo regulatorio colombiano se ha concentrado principalmente en aspectos asociados al control y aprovechamiento de los usos medicinales y científicos del cannabis, mientras que los enfoques de economía circular y valorización de residuos presentan una incorporación más limitada. En este sentido, se recomienda considerar mecanismos regulatorios que incentiven la identificación, segregación, trazabilidad y aprovechamiento de las corrientes residuales generadas durante las diferentes etapas de la cadena.

En particular, podrían evaluarse criterios de aprovechamiento de biomasa dentro de los instrumentos asociados a la operación de los establecimientos autorizados, siempre que estos sean compatibles con las condiciones sanitarias, ambientales y de seguridad aplicables. La incorporación progresiva de estos criterios permitiría pasar de una visión centrada exclusivamente en la gestión del residuo como material que debe ser dispuesto, hacia una perspectiva que reconozca su posible condición de recurso secundario.

También se recomienda fortalecer la articulación institucional entre las entidades responsables de aspectos sanitarios, ambientales, productivos y regulatorios. La valorización de los residuos de cannabis involucra simultáneamente requisitos relacionados con la producción, transformación, transporte, seguridad, composición de los materiales y destino final. Una mayor coordinación podría reducir barreras de interpretación y facilitar el desarrollo de proyectos piloto de aprovechamiento.

De igual manera, resulta pertinente promover instrumentos de orientación técnica que establezcan criterios para diferenciar las corrientes residuales, determinar sus posibles destinos y definir condiciones mínimas para su aprovechamiento. Estos instrumentos podrían facilitar que las empresas identifiquen alternativas de valorización sin comprometer los requisitos regulatorios aplicables a la cadena.

9.3 Recomendaciones para investigaciones futuras

Una de las principales líneas de investigación futura corresponde a la realización de estudios de campo con empresas y licenciatarios de Cannabis sativa en Colombia, con el propósito de cuantificar directamente los volúmenes de residuos generados en cada etapa de la cadena de suministro. La revisión bibliográfica permitió identificar diferentes tipos de residuos y alternativas de aprovechamiento, pero la disponibilidad limitada de información nacional impide establecer balances precisos de generación y valorización para el contexto colombiano.

También se recomienda desarrollar análisis de ciclo de vida con información primaria y condiciones locales, comparando las alternativas de valorización identificadas en la presente investigación. Esto permitiría determinar con mayor precisión los impactos ambientales asociados a cada ruta y establecer comparaciones entre aprovechamiento material, transformación biológica, recuperación energética y disposición.

Otra línea prioritaria corresponde a la realización de estudios de viabilidad económica a escala regional. La existencia de una alternativa tecnológica no garantiza por sí misma su viabilidad comercial, por lo que futuros estudios deberían incorporar costos de recolección, segregación, transporte, acondicionamiento, transformación, infraestructura, mano de obra y comercialización de los productos obtenidos. Estos análisis permitirían determinar en qué

condiciones una determinada ruta de valorización puede resultar económicamente viable para los productores.

En relación con la Industria 4.0, se recomienda desarrollar proyectos piloto de trazabilidad digital en cadenas específicas de cannabis, comenzando con sistemas de captura de información sobre generación, características, almacenamiento, transporte y destino de los residuos. Posteriormente, estos sistemas podrían incorporar tecnologías como IoT, sensores, RFID, blockchain o herramientas de análisis de datos, de acuerdo con las necesidades y capacidades de cada organización. Esta línea resulta especialmente pertinente debido al vacío identificado en la literatura respecto a la aplicación específica de estas tecnologías a la gestión de residuos de Cannabis sativa.

Finalmente, se recomienda ampliar la investigación hacia las fracciones menos estudiadas, particularmente hojas y raíces, así como hacia la biomasa posterior a los procesos de extracción. El predominio de estudios relacionados con tallos y fracciones fibrosas evidencia una concentración temática de la investigación que puede limitar la comprensión integral del potencial de valorización de toda la planta.

9.4 Transferencia y apropiación de los resultados

Los resultados de esta investigación pueden trascender el ámbito académico mediante estrategias de transferencia dirigidas a los actores que participan en la cadena de suministro de Cannabis sativa. En primer lugar, se propone elaborar una guía técnica de divulgación para productores y transformadores, en la que se sinteticen los tipos de residuos identificados, criterios básicos para su segregación y caracterización y las principales rutas de valorización identificadas. Esta herramienta permitiría convertir los resultados de la investigación en información práctica para apoyar la toma de decisiones en las organizaciones.

En segundo lugar, se recomienda presentar los resultados mediante una ponencia o espacio de socialización dirigido al sector productivo, especialmente en eventos relacionados con cannabis medicinal, agroindustria, sostenibilidad, economía circular o gestión de residuos. Este mecanismo permitiría contrastar los resultados bibliográficos con las experiencias de empresas y productores y, simultáneamente, identificar necesidades que puedan orientar investigaciones posteriores.

Como mecanismo de transferencia académica, se propone la elaboración de un artículo científico derivado de la monografía, enfocado en la relación entre gestión de residuos, economía circular y tecnologías de Industria 4.0 en la cadena de suministro de Cannabis sativa. La publicación permitiría ampliar la circulación de los resultados y contribuir a cerrar parcialmente el vacío identificado en la literatura.

Finalmente, se recomienda desarrollar una infografía o material visual de divulgación destinado a gremios, productores, instituciones educativas y otros actores interesados. Este material podría presentar de manera sencilla el flujo de generación de residuos, las principales alternativas de valorización y las oportunidades de trazabilidad digital identificadas en la investigación. De esta manera, el conocimiento generado no se limitaría al documento académico, sino que podría convertirse en información accesible para diferentes actores de la cadena.

En conjunto, estas recomendaciones buscan que los resultados obtenidos puedan ser utilizados como punto de partida para mejorar las prácticas de gestión de residuos, orientar futuras decisiones regulatorias, fortalecer la investigación aplicada y facilitar la apropiación del conocimiento por parte de los actores relacionados con la cadena de suministro de Cannabis sativa en Colombia.

10. Consideraciones Éticas y Legales

El desarrollo de esta monografía se rigió por los principios de integridad científica, honestidad intelectual y responsabilidad social que orientan la producción de conocimiento en la Fundación Universitaria Agraria de Colombia UNIAGRARIA, en concordancia con su misión institucional de formar profesionales comprometidos con el desarrollo sostenible y el bienestar de las comunidades. En materia de integridad académica, no se incurrió en plagio, fabricación ni falsificación de datos, resultados o información, y todas las fuentes consultadas fueron citadas correctamente conforme a las normas APA vigentes adoptadas por UNIAGRARIA.

Dado que la presente monografía corresponde a una revisión bibliográfica sistemática y se fundamenta en el análisis de literatura científica, técnica y normativa publicada, no se contempló la participación de sujetos humanos, ni la aplicación de entrevistas, encuestas, grupos focales u otros instrumentos de recolección de información directamente con personas. En consecuencia, no se recolectó información personal o sensible de participantes y no se requirió la obtención de consentimiento informado para el desarrollo de las actividades previstas en la investigación.

El manejo de las fuentes de terceros se realizó respetando los derechos de autor y las condiciones de uso establecidas por las bases de datos, repositorios y plataformas académicas consultadas. Las figuras, tablas, datos y demás contenidos provenientes de otras investigaciones fueron debidamente citados y referenciados, evitando la apropiación indebida de información y garantizando la trazabilidad de las fuentes utilizadas. La selección, interpretación y presentación de la información se realizó procurando mantener la fidelidad de los resultados reportados en las fuentes originales, sin alterar su significado para favorecer las conclusiones de la investigación.

Frente al uso de herramientas de inteligencia artificial generativa, estas se emplearon como apoyo en actividades de redacción, organización de ideas, revisión de estructura, corrección de estilo y diagramación visual. Durante la elaboración de este trabajo se utilizaron las siguientes herramientas: Napkin AI, para la diagramación visual de las tablas 1, 3 y 4 a partir de contenido elaborado por la autora; y Claude (Anthropic), como apoyo en la corrección de estilo, la organización de ideas y la verificación de referencias bibliográficas. Ninguna de estas herramientas fue utilizada para generar, inventar, fabricar o falsificar datos, resultados, cifras, referencias bibliográficas o evidencia científica. La totalidad de las fuentes citadas fue consultada y verificada, y toda la información incorporada al documento fue contrastada con las fuentes académicas y técnicas correspondientes.

Finalmente, esta monografía reconoce su responsabilidad frente al entorno social, económico y ambiental relacionado con la cadena de suministro de Cannabis sativa. Al orientarse al análisis de la gestión y valorización de los residuos generados en dicha cadena bajo un enfoque de economía circular, los resultados se presentaron de manera objetiva, verificable y sustentada en la evidencia disponible.

11. Referencias bibliográficas

Acosta, J. (2020). *Portafolio articulo*.

Almeida Barbosa, E. S. L. (2026). *Cannabic residue or industrial cannabis waste Perspectives on the utilization*. https://doi.org/10.1177/25785125261421439

Anderson, H., Matoma, B., & Ortega, V. M. (s/f). *Panorama del cannabis medicinal en el contexto rural integral colombiano Overview of medical cannabis in the Colombian comprehensive rural context*. https://doi.org/10.31095/podium.202

Andre, C. M., Hausman, J. F., & Guerriero, G. (2016). Cannabis sativa: The plant of the thousand and one molecules. *Frontiers in Plant Science*, *7*(FEB2016). https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00019

Araméndiz-Tatis, H., Cardona-Ayala, C., Espitia-Camacho, M., Herrera-Contreras, A., & Villalba-Soto, A. (2023). Agronomic evaluation of Cannabis sativa (L.) cultivars in northern Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, *17*(1). https://doi.org/10.17584/rcch.2023v17i1.15695

Aryal, K., Maraseni, T., Kretzschmar, T., Chang, D., Naebe, M., Neary, L., & Ash, G. (2024). Knowledge mapping for a secure and sustainable hemp industry: A systematic literature review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, *9*. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100550

Asamblea Nacional Constituyente. (1991). Constitución Política de Colombia de 1991. *Asamblea Nacional Constituyente*.

Basak, a M. B. J. L. H. S. ,a M. B. I. P. ,a J. D. ,b L. A. L. ,a,c and L. P. (2025). A Critical Review of Industrial Fiber Hemp Anatomy, Agronomic Practices, and Valorization into Sustainable Bioproducts. *PEER-REVIEWED REVIEW ARTICLE*.

Bichang'a, D. O., Oladele, I. O., Aramide, F. O., & Alabi, O. O. (2023). Extraction and Characterization of Natural Fiber from the Stem of Dombeya Buettneri Plant for Biodegradable Polymeric Composites Application. *Journal of Natural Fibers*, *20*(2). https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2283716

Brar, K. K., Raheja, Y., Chadha, B. S., Magdouli, S., Brar, S. K., Yang, Y. H., Bhatia, S. K., & Koubaa, A. (2024). A paradigm shift towards production of sustainable bioenergy and advanced products from Cannabis/hemp biomass in Canada. En *Biomass Conversion and Biorefinery* (Vol. 14, Número 3, pp. 3161–3182). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/s13399-022-02570-6

Budhathoki, R., Maraseni, T., & Apan, A. (2024). Enviro-economic and feasibility analysis of industrial hemp value chain: A systematic literature review. En *GCB Bioenergy* (Vol. 16, Número 6). John Wiley and Sons Inc. https://doi.org/10.1111/gcbb.13141

Calderón Márquez, A. J., & Rutkowski, E. W. (2020). Waste management drivers towards a circular economy in the global south – The Colombian case. *Waste Management*, *110*, 53–65. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.05.016

Campbell-Johnston, K., Vermeulen, W. J. V., Reike, D., & Brullot, S. (2020). The Circular Economy and Cascading: Towards a Framework. En *Resources, Conservation and Recycling: X* (Vol. 7). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2020.100038

Chávez Porras, Á., & Rodríguez González, A. (2016). Aprovechamiento de residuos orgánicos agrícolas y forestales en Iberoamérica. *Academia y Virtualidad*, *9*(2), 90–107. https://doi.org/10.18359/ravi.2004

Cherney, J. H., & Small, E. (2016a). Industrial hemp in North America: Production, politics and potential. En *Agronomy* (Vol. 6, Número 4). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/agronomy6040058

Cherney, J. H., & Small, E. (2016b). Industrial hemp in North America: Production, politics and potential. En *Agronomy* (Vol. 6, Número 4). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/agronomy6040058

Chrispim, M. C., Mattsson, M., & Ulvenblad, P. (2023). The underrepresented key elements of Circular Economy: A critical review of assessment tools and a guide for action. En *Sustainable Production and Consumption* (Vol. 35, pp. 539–558). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.11.019

Claro-Cala, C. M., Grao-Cruces, E., Toscano, R., Millan-Linares, M. C., Montserrat-De La Paz, S., Martin, M. E., & Mercedes, R. (2022). *Acyclic Diterpene Phytol from Hemp Seed Oil (Cannabis sativa L.) Exerts Anti-Inflammatory Activity on Primary Human Monocytes-Macrophages*. https://doi.org/10.3390/foods

Claudia Salanță, L., Corina Fărcaș, A., Borșa, A., & Rodica Pop, C. (2023). Current strategies for the management of valuable compounds from hops waste for a circular economy. En *Food Chemistry: X* (Vol. 19). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100876

Comisión de la Comunidad Andina. (2018). *Decisión 833*.

Comisión Europea. (2022). *COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSEJO, AL COMITÉ ECONÓMICO Y SOCIAL EUROPEO Y AL COMITÉ DE LAS REGIONES Estrategia para la circularidad y sostenibilidad de los productos textiles*. https://ec.europa.eu/eurostat

Congreso de la República de Colombia. (1993). *Ley 99 de 1993*.

Congreso de la República de Colombia. (2015). *Decreto 1076 de 2015*.

Congreso de la República de Colombia. (2016). *Ley 1787 de 2016*.

Congreso de la República de Colombia. (2017). *Decreto 613 de 2017*.

Congreso de la República de Colombia. (2021). *Decreto 811 de 2021*.

Congreso de la República de Colombia. (2025). *Decreto 1138 de 2025*.

Cortés, J. G., Ryu, B. R., Pauli, C., Barroso, L. R., & Park, S. H. (2024). Industrial Applications of Hemp Fiber in Europe and Evolving Regulatory Landscape. *Journal of Natural Fibers*, *21*(1). https://doi.org/10.1080/15440478.2024.2435047

Das, P. C., Patel, R., Babaei-Ghazvini, A., Acharya, B., Baik, O. D., & Tabil, L. G. (2025). Valorization of cannabis stalks into cellulose nanocrystals: A sustainable solution for cannabis waste management. *Industrial Crops and Products*, *237*. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.122153

de Aguiar, A. C., Vardanega, R., Viganó, J., & Silva, E. K. (2023). Supercritical Carbon Dioxide Technology for Recovering Valuable Phytochemicals from Cannabis sativa L. and

Valorization of Its Biomass for Food Applications. En *Molecules* (Vol. 28, Número 9). MDPI. https://doi.org/10.3390/molecules28093849

de Andrade, C. M. L., Caetano, T. T. V., Campos, F. K., Gandra, V. M., Alves, F. H. F., & Stein, V. C. (2023). Cannabis sativa L. in the cosmeceutical industry: prospects and biotechnological approaches for metabolite improvement. En *South African Journal of Botany* (Vol. 161, pp. 171–179). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.08.008

Diaz, A., Schöggl, J. P., Reyes, T., & Baumgartner, R. J. (2021). Sustainable product development in a circular economy: Implications for products, actors, decision-making support and lifecycle information management. *Sustainable Production and Consumption*, *26*, 1031–1045. https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.12.044

Dresbøll, D. B., & Magid, J. (2006). Structural changes of plant residues during decomposition in a compost environment. *Bioresource Technology*, *97*(8), 973–981. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.05.003

Duque Schumacher, A. G., Pequito, S., & Pazour, J. (2020). Industrial hemp fiber: A sustainable and economical alternative to cotton. *Journal of Cleaner Production*, *268*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122180

Elfordy, S., Lucas, F., Tancret, F., Scudeller, Y., & Goudet, L. (2008). Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete ("hempcrete") manufactured by a projection process. *Construction and Building Materials*, *22*(10), 2116–2123. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.016

Enarevba, D. R., & Haapala, K. R. (2024). The Emerging Hemp Industry: A Review of Industrial Hemp Materials and Product Manufacturing. En *AgriEngineering* (Vol. 6, Número 3, pp. 2891–2925). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/agriengineering6030167

Estrada Mejía, S. M. P. C. S. V. M. Z. S. E. G. D. Z. V. G. M. (2021). Aprovechamiento_subproductos_ proceso_cannabis_medicinal_infografías. *Universidad Católica de Manizales*.

Hancock, J., Osei-Bonsu, R., Hoque, M., Samuels, L., & Foster, E. J. (2023). Valorization of cannabis green waste to cellulose nanomaterials via phosphoric acid hydrolysis. *Industrial Crops and Products*, *201*. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116888

INVIMA. (2018). *Circular informativa para titulares, fabricantes e importadores de productos cosméticos con ingredientes derivados de cannabis*.

Jiménez Martínez. (2017). *Cultura y representaciones sociales 158*. www.culturayrs.org.mx

Jolaoso, L. A., Stagg-Williams, S. M., & Okolie, J. A. (2026). Thermochemical valorization of industrial hemp residues: Advances in hydrothermal conversion for biofuels and chemicals. En *Biomass and Bioenergy* (Vol. 204). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108349

Lara, A., Cely, E., Gómez-Pachón, E., Rubiano-Navarrete, A., López, A., Antosik, A. K., Vendrell, X., & Serafin, J. (2025). Cannabis-derived cellulose acetate electrospun membranes for therapeutic dressings: extraction, characterization, and prototype development. *Frontiers in Chemistry*, *13*. https://doi.org/10.3389/fchem.2025.1624736

Lawson, L., Degenstein, L. M., Bates, B., Chute, W., King, D., & Dolez, P. I. (2022). Cellulose Textiles from Hemp Biomass: Opportunities and Challenges. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(22). https://doi.org/10.3390/su142215337

Liu, M., Thygesen, A., Summerscales, J., & Meyer, A. S. (2017). Targeted pre-treatment of hemp bast fibres for optimal performance in biocomposite materials: A review. En *Industrial Crops and Products* (Vol. 108, pp. 660–683). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.07.027

López, A. (2021). *ISSN 2718-756X Serie de Documentos para el Cambio Estructural*.

Lv, G., Song, C., Xu, P., Qi, Z., Song, H., & Liu, Y. (2023). Blockchain-Based Traceability for Agricultural Products: A Systematic Literature Review. En *Agriculture (Switzerland)* (Vol. 13, Número 9). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/agriculture13091757

Malabadi, R. B., Kolkar, K. P., & Chalannavar, R. K. (2023). Industrial Cannabis sativa: Hemp oil for biodiesel production. *Magna Scientia Advanced Research and Reviews*, *9*(2), 022–035. https://doi.org/10.30574/msarr.2023.9.2.0145

Maqsood, S., Khalid, W., Kumar, P., Benmebarek, I. E., Rasool, I. F. U., Trif, M., Moreno, A., & Esatbeyoglu, T. (2025). Valorization of plant-based agro-industrial waste and by-products for the production of polysaccharides: Towards a more circular economy. En *Applied Food Research* (Vol. 5, Número 1). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100954

Marcelino, S., Gaspar, P. D., & Paço, A. (2023). Sustainable Waste Management in the Production of Medicinal and Aromatic Plants—A Systematic Review. En *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Número 18). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/su151813333

Marrot, L., Candelier, K., Valette, J., Lanvin, C., Horvat, B., Legan, L., & DeVallance, D. B. (2022). Valorization of Hemp Stalk Waste Through Thermochemical Conversion for Energy and Electrical Applications. *Waste and Biomass Valorization*, *13*(4), 2267–2285. https://doi.org/10.1007/s12649-021-01640-6

Meza-Sepúlveda, D. C., Castro, A. M., Zamora, A., Arboleda, J. W., Gallego, A. M., & Camargo-Rodríguez, A. V. (2021). Bio-based value chains potential in the management of cacao pod waste in colombia, a case study. En *Agronomy* (Vol. 11, Número 4). MDPI. https://doi.org/10.3390/agronomy11040693

Ministerio De Justicia y del Derecho. (2026). *RESOLUct{)N ti LA SUBDIRECCIÓN DE CONTROL Y FISCALIZACIÓN DE SUSTANCIAS QUÍMICAS Y ESTUPEFACIENTES DEL MINISTERIO DE JUSTICIA Y DEL DERECHO*.

Mnekin, L., & Ripoll, L. (2021). Topical use of cannabis sativa l. Biochemicals. En *Cosmetics* (Vol. 8, Número 3). MDPI. https://doi.org/10.3390/cosmetics8030085

Momeni, S., Safder, M., Khondoker, M. A. H., & Elias, A. L. (2021). Valorization of hemp hurds as bio-sourced additives in pla-based biocomposites. *Polymers*, *13*(21). https://doi.org/10.3390/polym13213786

Moscariello, C., Matassa, S., Pirozzi, F., Esposito, G., & Papirio, S. (2022). Valorisation of industrial hemp (Cannabis sativa L.) biomass residues through acidogenic fermentation and co-fermentation for volatile fatty acids production. *Bioresource Technology*, *355*. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127289

Moscariello, C., Matassa, S., Pirozzi, F., Esposito, G., & Papirio, S. (2024). Valorisation of industrial hemp (Cannabis sativa L.) residues and cheese whey into volatile fatty acids for single cell protein production. *Environmental Science and Ecotechnology*, *21*. https://doi.org/10.1016/j.ese.2024.100439

Obregón, C., Ortiz, M., Hernández, M., Hinestroza, J. P., & Danies, G. (2023). Preparation, Extraction, and Processing of Water-Retted Cannabis Sativa L. Fibers. *Journal of Natural Fibers*, *20*(1). https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2166647

Odieka, A. E., Obuzor, G. U., Oyedeji, O. O., Gondwe, M., Hosu, Y. S., & Oyedeji, A. O. (2022). The Medicinal Natural Products of Cannabis sativa Linn.: A Review. En *Molecules* (Vol. 27, Número 5). MDPI. https://doi.org/10.3390/molecules27051689

Olson, N. E., Neher, D. A., & Holden, V. I. (2023). On-Farm Conversion of Cannabis Sativa Waste Biomass into an Organic Fertilizer by Microbial Digestion. *Compost Science and Utilization*, *31*(1–2), 38–54. https://doi.org/10.1080/1065657X.2023.2296947

Pérez Aguilar, J., Franco, J. M., & Benítez Benítez, R. (2023). ARTÍCULO DE REVISION Biomasa residual de industria del Cannabis, una alternativa para la obtención de productos de alto valor agregado Waste biomass from the Cannabis industry, an alternative for obtaining products of high added value. *Rev. Colomb. Biotecnol*, *1*(2023), 92–103. https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v25n1.102648

Pérez, J. I. (2017). Identificación y evaluación de impactos ambientales en el Campus Ciudad Universitaria, Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro de Coatepec, Toluca México. *Acta Universitaria*, *27*(3), 36–56. https://doi.org/10.15174/au.2017.1249

Piedrahita-Rodríguez, S., Cardona Urrea, S., Escobar García, D. A., Ortiz-Sánchez, M., Solarte-Toro, J. C., & Cardona Alzate, C. A. (2023). Life cycle assessment and potential geolocation of a multi-feedstock biorefinery: Integration of the avocado and plantain value chains in rural zones. *Bioresource Technology Reports*, *21*. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101318

Pieracci, Y., Pistelli, L., D'Ambrosio, B., Paris, R., Flamini, G., & Bassolino, L. (2025). From Waste to Resource: Mineral and Biochemical Characterization of Hemp By-Products in the Fiber and Seed Supply Chain. *Agronomy*, *15*(3). https://doi.org/10.3390/agronomy15030564

Policia Nacional. (2025). *Panorama Nacional del Cannabis, regulación y usos*.

Rey-Rubiano, A. (2024). Research and Publish. 2. Answering the Question: Study Design. En *Revista Colombiana de Gastroenterologia* (Vol. 39, Número 2, pp. 176–178). Asociacion Colombiana de Gastroenterologia. https://doi.org/10.22516/25007440.1189

Rivera, N. M. (2019). *The Challenges of Medicinal Cannabis in Colombia A look at small-and medium-scale growers*.

Robertson, K. J., Brar, R., Randhawa, P., Stark, C., & Baroutian, S. (2023). Opportunities and challenges in waste management within the medicinal cannabis sector. En *Industrial Crops and Products* (Vol. 197). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116639

Rodrigo Ilarri, J., & Rodrigo Clavero, M. E. (2024). Analysis of the Prices of Recycling Byproducts Obtained from Mechanical–Biological Treatment Plants in the Valencian Community (Spain). *Sustainability (Switzerland)*, *16*(16). https://doi.org/10.3390/su16166714

Salehi, A., Puchalski, K., Shokoohinia, Y., Zolfaghari, B., & Asgary, S. (2022). Differentiating Cannabis Products: Drugs, Food, and Supplements. En *Frontiers in Pharmacology* (Vol. 13). Frontiers Media S.A. https://doi.org/10.3389/fphar.2022.906038

Sampaolesi, S., Briand, L. E., Saparrat, M. C. N., & Toledo, M. V. (2023). Potentials of Biomass Waste Valorization: Case of South America. En *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Número 10). MDPI. https://doi.org/10.3390/su15108343

Sánchez, P. A. C. (2021). Cannabis for medical and scientific purposes: The Colombian landscape. *Colombian Journal of Anesthesiology*, *49*(2). https://doi.org/10.5554/22562087.e954

Sgrò, S., Lavezzi, B., Caprari, C., Polito, M., D'elia, M., Lago, G., Furlan, G., Girotti, S., & Ferri, E. N. (2016). *Delta9-THC determination by the EU official method: evaluation of measurement uncertainty and compliance assessment of hemp samples*. https://doi.org/10.1007/s00216-021-03283-x/Published

Steyn, K., de Villiers, W., & Babafemi, A. J. (2025). A comprehensive review of hempcrete as a sustainable building material. En *Innovative Infrastructure Solutions* (Vol. 10, Número 3). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/s41062-025-01906-1

Sullins, T., Pillay, S., Komus, A., & Ning, H. (2017). Hemp fiber reinforced polypropylene composites: The effects of material treatments. *Composites Part B: Engineering*, *114*, 15–22. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.02.001

Tramarico, C. L., Ortiz Barrios, M. A., & Salomon, V. A. P. (2026). Evaluating Operational and Environmental Factors in Circular Supply Chains: A Decision-Making Model Integrating Sustainability Dimensions. *Logistics*, *10*(6). https://doi.org/10.3390/logistics10060129

Tripathi, M., Sharma, M., Bala, S., Connell, J., Newbold, J. R., Rees, R. M., Aminabhavi, T. M., Thakur, V. K., & Gupta, V. K. (2023). Conversion technologies for valorization of hemp lignocellulosic biomass for potential biorefinery applications. *Separation and Purification Technology*, *320*. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124018

Yaashikaa, P. R., Senthil Kumar, P., & Varjani, S. (2022). Valorization of agro-industrial wastes for biorefinery process and circular bioeconomy: A critical review. *Bioresource Technology*, *343*. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126126

Zhao, G., Ye, C., Zubairu, N., Mathiyazhagan, K., & Zhou, X. (2025). Deployment of Industry 4.0 technologies to achieve a circular economy in agri-food supply chains: A thorough analysis of enablers. *Journal of Environmental Management*, *373*. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123856

Anexos

Anexo A. Cronograma ejecutado

El desarrollo de la investigación se llevó a cabo de manera progresiva durante el periodo establecido para la elaboración de la monografía, de acuerdo con las etapas definidas en la metodología. Las actividades comprendieron la delimitación del problema y los objetivos de investigación, la revisión y selección de literatura científica y técnica, la organización y análisis de la información, el desarrollo del análisis bibliométrico, la identificación y caracterización de los residuos de *Cannabis sativa*, la evaluación de las alternativas de valorización mediante

criterios técnicos, ambientales y económicos, el análisis del potencial de aplicación de tecnologías de Industria 4.0 y, finalmente, la elaboración, revisión y consolidación del informe final.

El cronograma detallado de las actividades desarrolladas durante la investigación se presenta como evidencia del proceso de ejecución del proyecto.

Actividad desarrollada	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Delimitación del problema y formulación de objetivos	✓					
Revisión bibliográfica y construcción del marco referencial	✓	✓				
Identificación y caracterización de residuos		✓	✓			
Análisis de alternativas de valorización			✓	✓		
Elaboración de matriz de valoración				✓	✓	
Análisis de tecnologías de Industria 4.0					✓	
Diseño y aplicación de ecuaciones de búsqueda						✓
Selección y organización de artículos y documentos						✓
Análisis bibliométrico y elaboración de redes de conocimiento						✓
Integración y discusión de resultados						✓
Elaboración de conclusiones y recomendaciones						✓
Revisión y consolidación del informe final						✓
Elaboración de matriz de valoración						✓

Anexo B. Presupuesto

Categoría	Detalle	Cant.	Valor unit. (COP)	Subtotal (COP)
Servicios básicos	Gastos de internet ($80.000/mes × 6 meses)	6	$ 80.000	$ 480.000
Personal	Honorarios/Dedicación investigativa	6	$ 500.000	$ 3.000.000

Materiales y suministro	Poster Cadena de Valor (Impresión / Formato)	1	$ 35.000	$ 35.000
Transporte	Transporte a la universidad reunión con tutor.	5	$ 6.000	$ 30.000
Personal	Honorarios Tutor Profesor Giovanny Morantes	6	$ 230.000	$ 1.380.000
TOTAL ESTIMADO	**$ 4.925.000**			