



**DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA CON BASE EN CRITERIOS DE
SOSTENIBILIDAD PARA LA EXTRACCIÓN DE MICROPLÁSTICOS EN EL
SUELO DEL MUNICIPIO ZONA BANANERA, MAGDALENA-COLOMBIA**

Valentina Posada Luna

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia
2023

**DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA CON BASE EN CRITERIOS DE
SOSTENIBILIDAD PARA LA EXTRACCIÓN DE MICROPLÁSTICOS EN EL
SUELO DEL MUNICIPIO ZONA BANANERA, MAGDALENA-COLOMBIA**

Valentina Posada Luna

Código 2301-031

Director: José Francisco Ibla Gordillo
Co-directora: Liliana Figueroa Del Castillo

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniera Ambiental

Línea de Investigación:
Ingeniería para la sostenibilidad

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia
2023

Nota de Salvedad de Responsabilidad Institucional

La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velará por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

(Dedicatoria)

A mis padres, por su amor y apoyo incondicional, confianza y paciencia durante la trayectoria de la carrera y darme la oportunidad de estudiar una carrera que me motive.

A mi dedicación y esfuerzo en la culminación de este proyecto de investigación .

A mi familia, por el apoyo y consejos durante el transcurso de mi vida.

Agradecimientos

A mis padres, James Posada Rosero y Luz Nelly Luna, quienes me han apoyado incondicionalmente durante el transcurso de mi vida y en todos mi planes, dándome su amor, paciencia, confianza y consejos para seguir adelante ante cualquier adversidad.

A mi director, José Francisco Ibla Gordillo y co-directora, Liliana Figueroa del Castillo, por su paciencia, motivación, confianza, apoyo, colaboración y tiempo dedicado en la elaboración del proyecto de investigación, agradeciendo infinitamente por confiar en mi talento para ejecutar una idea innovadora.

A Juan Pablo Granados, gerente de la finca y Jonathan Araujo, trabajador de la finca por su colaboración en el desarrollo del proyecto, quienes dejaron a un lado sus tareas diarias para poder realizar la visita, las encuestas y la toma de muestra de suelos en la finca bananera “Vega Caballero”, Zona Bananera, Magdalena.

A mis amigos y familia en general, por su apoyo y acompañarme en algún punto para la finalización del proyecto de investigación.

A la Universidad El Bosque por permitirme formarme y educarme como ingeniería ambiental.

TABLA DE CONTENIDO

1. Resumen.....	11
2. Abstract.....	12
3. Introducción.....	13
4. Planteamiento del problema.....	14
5. Justificación.....	16
6. Objetivos generales y específicos.....	18
6.1. Objetivo general.....	18
6.2. Objetivos específicos.....	18
7. Marco de referencia.....	19
7.1. Antecedentes.....	19
7.2. Estado de Arte.....	19
7.2.2. Investigaciones científicas nacionales.....	20
7.2.3. Investigaciones científicas internacionales.....	21
7.3. Marco Conceptual.....	21
7.4. Marco Teórico.....	24
7.4.1. Fuentes y vías de liberación de microplásticos en los suelos.....	24
7.4.2. Descomposición y degradación de microplásticos en la matriz suelo.....	25
7.4.3. Migración y acumulación de microplásticos en el suelo.....	26
7.4.4. Métodos analíticos de identificación y cuantificación.....	27
7.4.5. Principios de química verde.....	27
7.5. Marco Normativo.....	29
7.6. Marco Geográfico.....	30
7.7. Marco Institucional.....	31
8. Metodología.....	32
8.1. Marco metodológico.....	32
8.2. Plan de Trabajo.....	32
8.3. Procedimiento Metodológico.....	33
8.3.1. Objetivo Específico 1.....	33
8.3.1.1. Visita técnica a la finca bananera.....	33
8.3.1.2. Muestreo de suelos.....	34
8.3.2. Objetivo Específico 2.....	35
8.3.2.1. Caracterización física y química de muestras de suelo.....	35
8.3.2.2. Caracterización química y física de microplásticos.....	37
8.3.2.2.1. Análisis de composición química de muestras plásticas.....	37
8.3.2.2.2. Caracterización física de microplásticos.....	38
8.3.3. Objetivo Específico 3.....	40
8.3.3.1. Revisión sistemática de la literatura.....	40

8.3.3.2. Análisis de decisión multicriterio.....	42
8.3.3.3. Análisis estadístico.....	43
8.3.3.4. Construcción de estrella verde.....	44
9. Resultados y análisis de resultados.....	47
9.1. Objetivo específico 1.....	47
9.1.1. Visita Técnica Finca Bananera.....	47
9.2. Resultados objetivo específico 2.....	50
9.2.1. Caracterización física y química del suelo.....	50
9.2.2. Caracterización física y química de los microplásticos.....	51
9.2.2.1. Identificación de la composición química de las muestras plásticas.....	51
9.2.2.2. Identificación y cuantificación de microplásticos.....	53
9.2.3. Discusión de resultados.....	55
9.3. Resultados objetivo específico 3.....	59
9.3.1. Revisión Sistemática.....	59
9.3.2. Análisis multicriterio.....	61
9.3.3. Procedimiento de metodología propuesta.....	66
9.3.3.1 Preparación de microplásticos y muestra de suelo.....	66
9.3.3.2. Etapas de extracción de microplásticos.....	67
9.3.3.3. Escenarios de la metodología: Aplicación directa y simulación.....	69
9.3.4. Análisis estadísticos de los ensayos experimentales.....	70
9.3.4.1. Ensayos experimentales sin simulación.....	70
9.3.4.2. Ensayos experimentales bajo simulación.....	76
9.3.5. Evaluación de criterios de sostenibilidad basado en la química verde.....	81
9.3.5.1. Diagnóstico del proceso de la metodología propuesta de extracción de MPI en la matriz suelo.....	82
9.3.5.2. Diagnóstico del proceso de la metodología Scopetani et al. (2020).....	93
9.3.6. Discusión de resultados.....	103
10. Conclusiones.....	106
11. Recomendaciones.....	107
12. Referencias Bibliográficas.....	108
13. Anexos.....	117
Anexo A. Cuantificación visual bajo la guía de Shaw Institute (2019) de la muestra de 15 g.....	117
Anexo B. Cuantificación visual bajo la guía de Shaw Institute (2019) de la muestra de 30 g.....	117
Anexo C. Cálculos de la estrella verde del diseño metodológico propuesto.....	117
Anexo D. Cálculos de la estrella verde de la metodología de Scopetani et al. (2020).....	119

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Bolsa de polietileno compuesta por grandes cadenas de polímeros formadas a su vez por muchos monómeros de etileno.....	17
Figura 2. Clasificación de microplásticos según su forma estandarizada y sus aplicaciones, mostrando microgránulos, perlas, fibras, espuma y fragmento.....	18
Figura 3. Fuentes de contaminación de los microplásticos para el suelo.....	20
Figura 4. Diagrama conceptual donde se exponen las fuentes primarias de liberación de microplásticos en (a) los sistemas agrícolas y (b) las zonas urbanas, junto con (c) el proceso de migración y acumulación de MP.....	21
Tabla 1. Principios de la química verde.....	22
Tabla 2. Regulaciones vigentes a nivel nacional sobre plásticos.....	24
Figura 5. Fotomapa del municipio Zona Bananera, Magdalena.....	26
Figura 6. Plan de trabajo.....	28
Figura 7. Procedimiento objetivo específico 1.....	29
Figura 8. Muestreo a partir del método zigzag en la finca bananera.....	30
Figura 9. Procedimiento de objetivo específico 2.....	31
Figura 10. Espectrómetro Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR).....	33
Figura 11. Procedimiento de lectura del filtro.....	35
Tabla 3. Ficha de conteo de microplásticos.....	35
Figura 12. Procedimiento de objetivo específico 3.....	36
Tabla 4. Marco PSALSAR para estudios sistemáticos.....	36
Figura 13. Jerarquía AHP.....	38
Figura 14. Escala de Saaty.....	39
Tabla 5. Clasificación de riesgos para la salud humana, ambiente y potencial accidente químico.....	40
Tabla 6. Capacidad de degradabilidad y renovabilidad.....	41
Figura 15. (a) Plantación de banano embolsado. (b) Racimo embolsado e identificado. (c) Proceso de corte de racimo. (d) Garrucha de transporte de racimo.....	43
Figura 16. (a) Evidencia fotográfica de las tiras plásticas. (b) Evidencia fotográfica de los residuos de bolsas plásticas de PEBD.....	44
Figura 17. Uso y manejo de los diferentes plásticos dentro del proceso del cultivo bananero.	44
Figura 18. (a) (c) Evidencia fotográfica de la presencia de fragmentos de bolsas plásticas y pitas en el suelo (b) Evidencia fotográfica de pitas enterradas en el suelo (d) Evidencia fotográfica de recolección inadecuada de tiras de los productos plásticos empleados.....	45
Tabla 7. Propiedades fisicoquímicas de la muestra de suelo.....	45
Figura 19. Espectro infrarrojo de la bolsa plástica azul.....	47
Figura 20. Espectro infrarrojo de la pita plástica amarilla.....	47
Figura 21. Espectro infrarrojo de la tira plástica marrón.....	48
Figura 22. (a) Micrografías de estereoscopio a 4,5x evidenciados en la muestra de 30 g (b) Micrografías de estereoscopio a 4,5x evidenciados en la muestra de 15 g (c) Micrografías de	

filamentos multicolores de Shaw Institute (2019).....	49
Figura 23. (a)(b)(c) Micrografías de estereoscopio a 4,5x evidenciados en la muestra de 15 g.(d)(e)(f) Micrografías de microscopía óptica a 10x (d) Filamento de pita plástica (e) Filamento de la tira plástica marrón. (f) Fragmento transparente de la bolsa plástica.....	50
Figura 24. (a)(b) Micrografías de estereoscopio a 4,5x evidenciados en la muestra de 30 g (d)(e) Micrografías de microscopía óptica a 10x, (d) Filamento de la bolsa plástica. (e) Filamento de la pita plástica amarilla.....	50
Figura 25. Estructura química del polietileno (PE).....	51
Figura 26. Espectro FTIR de polietileno (PE).....	52
Figura 27. Diagrama de flujo PRISMA.....	55
Tabla 8. Información de los artículos seleccionados.....	55
Figura 28. Criterios en jerarquía AHP.....	57
Figura 29. Selección de alternativas.....	58
Tabla 9. Parámetros de la metodología de extracción seleccionadas de los artículos seleccionados.....	58
Figura 30. Muestra de microplástico en forma de triángulo y cuadrado.....	62
Figura 31. Diagrama de flujo del diseño de la metodología propuesta de extracción.....	63
Figura 32. Diseño de la metodología propuesta de extracción.....	64
Figura 33. Caja negra de simulación de condiciones experimentales.....	65
Figura 34. Diseño para la simulación de condiciones experimentales.....	65
Tabla 10. Resultados generales de los ensayos experimentales de la metodología propuesta de extracción de MPI sin simulación.....	66
Tabla 11. Resultados por forma de los triángulos de los ensayos experimentales de la metodología propuesta de extracción de MPI sin simulación.....	66
Tabla 12. Resultados por forma de cuadrado de los ensayos experimentales de la metodología propuesta de extracción de MPI sin simulación.....	67
Tabla 13. Descarte de valores estadísticos para mejorar la confiabilidad de los ensayos experimentales sin simulación por desviación estándar.....	69
Figura 35. Eficiencia de recuperación entre método por conteo y por cuantificación de masa sin simulación en general.....	70
Figura 36. Eficiencia de recuperación entre método por conteo y por cuantificación de masa sin simulación según la forma cuadrada y triangular.....	70
Tabla 14. Resultados de los ensayos experimentales de la metodología propuesta de extracción de MPI bajo simulación.....	71
Tabla 15. Resultados por forma de triángulo de los ensayos experimentales de la metodología propuesta de extracción de MPI bajo simulación.....	72
Tabla 16. Resultados por forma de cuadrado de los ensayos experimentales de la metodología propuesta de extracción de MPI bajo simulación.....	72
Tabla 17. Descarte de valores estadísticos para mejorar la confiabilidad de los ensayos experimentales bajo simulación por desviación estándar.....	74
Figura 37. Eficiencia de recuperación entre método por conteo y por cuantificación de masa sin simulación en general.....	75

Figura 38. Eficiencia de recuperación entre método por conteo y por cuantificación de masa sin simulación según la forma cuadrada y triangular.....	75
Tabla 18. Puntuación de principios de la química verde a evaluar.....	76
Tabla 19. Puntuación de sustancias empleadas para la construcción de la estrella verde de la metodología propuesta de extracción de MPI.....	78
Tabla 20. Matriz de diagnóstico de la metodología planteada de extracción de MPI por el método de densidad a base de aceite.....	79
Tabla 21. Puntuación de principios evaluados en cada etapa de la metodología propuesta de extracción de MPI.....	85
Tabla 22. Cálculo del índice de área de la estrella verde de la metodología propuesta de extracción de MPI.....	86
Figura 39. Estrella verde de la metodología planteada de extracción de MPI en el suelo de la Zona Bananera.....	87
Tabla 23. Puntuación de sustancias empleadas para la construcción de la estrella verde de la metodología Scopetani et al. (2020).....	88
Tabla 24. Matriz de diagnóstico de la metodología Scopetani et al. (2020).....	89
Tabla 25. Puntuación de principios evaluados en cada etapa de la metodología Scopetani et al. (2020).....	95
Tabla 26. Cálculo del índice de área de la estrella verde de la metodología Scopetani et al. (2020).....	96
Figura 40. Estrella verde de la metodología de Scopetani et al. (2020).....	97
Figura 41. Comparación de las estrellas verdes de la metodología de Scopetani et al. (2020) y del diseño metodológico propuesto.....	100

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Principios de la química verde.....	22
Tabla 2. Regulaciones vigentes a nivel nacional sobre plásticos.....	24
Tabla 3. Ficha de conteo de microplásticos.....	35
Tabla 4. Marco PSALSAR para estudios sistemáticos.....	36
Tabla 5. Clasificación de riesgos para la salud humana, ambiente y potencial accidente químico.....	40
Tabla 6. Capacidad de degradabilidad y renovabilidad.....	41
Tabla 7. Propiedades fisicoquímicas de la muestra de suelo.....	45
Tabla 8. Información de los artículos seleccionados.....	55
Tabla 9. Parámetros de la metodología de extracción seleccionadas de los artículos seleccionados.....	58
Tabla 10. Resultados generales de los ensayos experimentales de la metodología propuesta de extracción de MPI sin simulación.....	66
Tabla 11. Resultados por forma de los triángulos de los ensayos experimentales de la metodología propuesta de extracción de MPI sin simulación.....	66
Tabla 12. Resultados por forma de cuadrado de los ensayos experimentales de la metodología propuesta de extracción de MPI sin simulación.....	67
Tabla 13. Descarte de valores estadísticos para mejorar la confiabilidad de los ensayos experimentales sin simulación por desviación estándar.....	69

Tabla 14. Resultados de los ensayos experimentales de la metodología propuesta de extracción de MPI bajo simulación.....	71
Tabla 15. Resultados por forma de triángulo de los ensayos experimentales de la metodología propuesta de extracción de MPI bajo simulación.....	72
Tabla 16. Resultados por forma de cuadrado de los ensayos experimentales de la metodología propuesta de extracción de MPI bajo simulación.....	72
Tabla 17. Descarte de valores estadísticos para mejorar la confiabilidad de los ensayos experimentales bajo simulación por desviación estándar.....	74
Figura 37. Eficiencia de recuperación entre método por conteo y por cuantificación de masa sin simulación en general.....	75
Figura 38. Eficiencia de recuperación entre método por conteo y por cuantificación de masa sin simulación según la forma cuadrada y triangular.....	75
Tabla 18. Puntuación de principios de la química verde a evaluar.....	76
Tabla 19. Puntuación de sustancias empleadas para la construcción de la estrella verde de la metodología propuesta de extracción de MPI.....	78
Tabla 20. Matriz de diagnóstico de la metodología planteada de extracción de MPI por el método de densidad a base de aceite.....	79
Tabla 21. Puntuación de principios evaluados en cada etapa de la metodología propuesta de extracción de MPI.....	85
Tabla 22. Cálculo del índice de área de la estrella verde de la metodología propuesta de extracción de MPI.....	86
Tabla 23. Puntuación de sustancias empleadas para la construcción de la estrella verde de la metodología Scopetani et al. (2020).....	88
Tabla 24. Matriz de diagnóstico de la metodología Scopetani et al. (2020).....	89
Tabla 25. Puntuación de principios evaluados en cada etapa de la metodología Scopetani et al. (2020).....	95
Tabla 26. Cálculo del índice de área de la estrella verde de la metodología Scopetani et al. (2020).....	96

ACRÓNIMOS

MPI: Microplásticos
CGSM: Ciénaga Grande de Santa Marta
PEBD: Polietileno de baja densidad
IGAC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi
PET: Tereftalato de polietileno
PE: Polietileno
PVC: Cloruro de polivinilo
PS: Poliestireno
PU: Poliuretano
PC: Policarbonato

1. Resumen

Los polímeros sintéticos son materiales que han sido desarrollados en los últimos 60 años como alternativa en las dinámicas industriales gracias a su versatilidad y bajo costo resultando ser un problema por la gestión y disposición final inadecuada de los residuos plásticos, impactando negativamente las propiedades del suelo y la salud humana. En el presente estudio, se busca diseñar una metodología de extracción de microplásticos en la Zona Bananera, Magdalena considerando la caracterización del suelo de la zona y el tipo de microplástico empleado en las actividades agrícolas bajo unos criterios de sostenibilidad establecidos con base en los principios de la química verde.

Esto se hizo gracias a una revisión sistemática y análisis multicriterio para establecer las etapas físicas y químicas de la metodología comprendiendo la información de las prácticas agrícolas, la caracterización de los microplásticos y suelo sumado con el cálculo de la estrella verde. Como resultados, se evidenció la presencia de microplásticos en forma de filamento proveniente de la degradación de los productos plásticos de la finca bananera, cuya acumulación afecta la densidad aparente y porosidad del suelo. Además, se plantearon 9 etapas de la metodología, el cual obtuvo una eficiencia por conteo entre $56\% \pm 7$ - $67\% \pm 11$ y por cuantificación de masa $73\% \pm 11$ - $77\% \pm 14$, sugiriendo una determinación más óptima en términos de masa. La metodología propuesta cumplió en un 52,92% con los principios de química verde con respecto al 30,61% de Scopetani et al. (2020), los valores brindan unas determinaciones para evaluar la sostenibilidad del proceso.

Palabras clave: Microplástico, Extracción, Suelo, Química verde, Sostenibilidad

2. Abstract

Synthetic polymers are materials that have been developed in the last 60 years as an alternative in the industrial dynamics thanks to their versatility and low cost, resulting in a problem due to the inadequate management and final disposal of plastic waste, negatively impacting soil properties and human health. This study seeks to design a methodology for the extraction of microplastics in Zona Bananera, Magdalena, considering the characterization of the soil in the area and the type of microplastics used in agricultural activities under sustainability criteria established based on the principles of green chemistry.

This was done thanks to a systematic review and multi-criteria analysis to establish the physical and chemical stages of the methodology, including information on agricultural practices, the characterization of microplastics and soil, together with the calculation of the green star. The results showed the presence of microplastics in the form of filaments from the degradation of plastic products from the banana farm, whose accumulation affects the bulk density and porosity of the soil. In addition, 9 stages of the methodology were proposed, which obtained an efficiency by counting between $56\% \pm 7$ - $67\% \pm 11$ and by mass quantification $73\% \pm 11$ - $77\% \pm 14$, suggesting a more optimal determination in terms of mass. The proposed methodology complied in 52.92% with the principles of green chemistry with respect to 30.61% of Scopetani et al. (2020), the values provide some determinations to evaluate the sustainability of the process.

Keywords: Microplastic, Extraction, Soil, Green chemistry, Sustainability

3. Introducción

Actualmente, la aplicación intensiva de plásticos ha impulsado la producción masiva de estos y sus productos derivados, ocasionando como resultado una cantidad preocupante de desechos plásticos que llegan al ambiente (Geyer et al., 2017; Jambeck et al., 2015, como se citó en Wang et al., 2020). En los últimos 50 años, la producción de plástico ha incrementado a un anual de 8,7% (Rojo-Nieto & Martínez, 2017), donde la producción mundial para el 2018 fue de 348 millones de toneladas y cerca del 79% de los residuos se disiparon en vertederos y sistemas ambientales como los suelos (Priya et al., 2022; Yuan et al., 2022; Jia et al., 2022).

Los polímeros sintéticos son materiales que han sido desarrollados en los últimos 60 años como alternativa en las dinámicas industriales gracias a sus propiedades versátiles y de bajo costo, además por las dinámicas sociales y ambientales se ha demostrado que su presencia en cuerpos hídricos ha afectado la calidad de esta esfera ambiental, debido a que pueden fragmentarse y mantenerse en el agua en tamaños en la escala milimétrica y micrométrica por cual se han denominado microplásticos (Surampalli et al., 2018). También se ha comprobado que los principales sumideros de microplásticos en la esfera ambiental de suelo resultan ser las tierras de cultivos, dado a la implementación de diversas técnicas y productos derivados del plástico para proteger los cultivos y aumentar el rendimiento, cuya incidencia de microplásticos se deriva de la película plástica, aplicación de fertilizantes, mala disposición de productos derivados del plásticos y riego artificial con aguas superficiales contaminadas (Jia et al., 2022).

En Colombia, las fincas bananeras son un cultivo intensivo que generan gran cantidad de residuos sólidos como lo son las bolsas plásticas de polietileno de baja densidad, utilizadas en los racimos de bananos para obtener mejor calidad y mayor cantidad de fruta, creando un microclima favorable para el crecimiento de los bananos y así, una mejor productividad (Uribe, 2020). No obstante, por la falta de un control estricto y manejo adecuado de estas hasta su correcta disposición final terminan contaminando cuerpos de agua cercanos y/o el suelo agrícola propio del cultivo volviéndose una problemática de interés, puesto que con el tiempo estos productos plásticos se fragmentan en partículas más pequeñas conocidas como microplásticos, aspecto que no ha sido abordado con rigor específicamente en el suelo dedicado a la agricultura.

Considerando lo anterior, el presente trabajo pretende abordar dicha problemática desde una perspectiva ingenieril proponiendo metodología que permita la extracción de los microplásticos de un suelo particular destinado a la actividad del cultivo bananero del municipio Zona Bananera, Magdalena con base en criterios de sostenibilidad, así como sea puntualmente acorde a las propiedades del suelo y el tipo de plásticos que se empleen en la finca bananera.

4. Planteamiento del problema

En la última década, los residuos de microplásticos en el ambiente han aumentado en línea con la creciente producción de plástico alrededor del mundo (Priya et al., 2022), debido a las prácticas ineficientes de eliminación de residuos y el proceso de fragmentación y degradación de los polímeros en los ecosistemas acuáticos y terrestres, lo cual ha llevado a la acumulación de este contaminante emergente a un ritmo inconcebible.

Los suelos destinados a la actividad agrícola resultan ser los principales sumideros de los microplásticos debido a las prácticas inadecuadas en el manejo de los productos plásticos, como son las bolsas plásticas y agroquímicos, las cuales se utilizan para mejorar el rendimiento y calidad de los cultivos, además del riego artificial con agua tratada residual o de alguna fuente hídrica cercana contaminada por plásticos (Jia et al., 2022).

Algunos estudios han determinado que la presencia de microplásticos en el suelo representa un riesgo ambiental potencial, puesto que originan cambios en las propiedades del suelo, rendimiento de las plantas, actividad microbiana y fertilidad del suelo (Wang et al., 2020). Además, se ha comprobado que este contaminante emergente es capaz de absorber contaminantes orgánicos persistentes (COP) que a lo largo de la cadena alimentaria afecta a la salud humana (Yuan et al., 2022).

Pese a que las cantidades de este contaminante emergente que se diseminan en los suelos son de 4 a 23 veces mayores que las que se dispersan en los sistemas acuáticos marinos (Horton et al., 2017, como se citó en Jia et al., 2022), las investigaciones sobre los microplásticos enfocados en los suelos siguen siendo escasos, cuando estos dominios resultan ser más susceptibles a la contaminación por plásticos que los océanos (Kononov et al., 2022; Wang et al., 2020).

No obstante, la falta de información sobre las metodologías para la determinación y cuantificación de microplásticos en suelos crea una brecha científica para equiparar resultados y métodos capaces para la identificación de estos plásticos de menor tamaño provenientes de diferentes polímeros y por consiguiente, limita la aplicación de métodos de separación de microplásticos en los suelos contaminados según su composición química y el tipo de suelo (Yuan et al., 2022).

Dentro del complejo de la CGSM, se evidencia un manejo inadecuado y disposición final de plásticos en la agricultura al interior del municipio Zona Bananera, Magdalena, área que se caracteriza por la actividad agrícola de diferentes productos, entre los cuales se destaca el banano y plátano, donde aproximadamente el 30% de su extensión total como municipio se encuentra cultivada de bananos para exportación y comercialización (MINAGRICULTURA, 2017).

De acuerdo con el plan básico de ordenamiento del municipio Zona Bananera realizado en el 2001, los residuos sólidos en las plantaciones de banano resultan ser en un 100% de polímeros, principalmente de polietileno por las bolsas plásticas empleadas para crear microclimas aptos para el crecimiento de los racimos de bananos, las cuales por una inadecuada disposición final se quedan en los suelos y por procesos de fotodegradación, se desintegran en pequeños fragmentos de plásticos de menor tamaño, lo que ha conllevado a aumentar la presencia de polietileno en las tierras de cultivo (Secretaría de planeación, 2001).

En este orden ideas, la inadecuada disposición final de las bolsas de plástico de la actividad bananera junto con la falta de información sobre los métodos de identificación y extracción de los microplásticos señala una situación problema de interés para la investigación y proposición de soluciones. Por este motivo, con este trabajo se pretende plantear un diseño de una metodología de extracción de microplásticos en el suelo a escala laboratorio para comprender la dinámica entre estas variables y empezar un camino de soluciones ante esta problemática emergente.

5. Justificación

Los microplásticos (MPI) resultan ser contaminantes persistentes en el ambiente debido a sus diferentes fuentes de origen, mecanismos de transporte y composición química, cuya última contempla una amplia gama de compuestos de polímeros que pueden actuar como vectores de componentes contaminantes que se adhieren a los MPI y por dinámicas ecológicas, llegan a afectar la salud ecosistémica de los suelos, así como por la cadena alimenticia perjudicar la salud humana (Yuan et al., 2022). Así pues, resulta importante la identificación y cuantificación de MPI para la aplicación de métodos de extracción de estos y así contrarrestar los efectos que este tipo de contaminante emergente.

La contaminación derivada de los microplásticos ha llamado el interés de la comunidad científica en los últimos años, dado a su amplia distribución y persistencia en los diferentes ecosistemas y sus repercusiones en la salud humana y biodiversidad (Priya et al., 2022), sin embargo, las investigaciones resultan estar enfocados en los sistemas acuáticos, tanto de agua dulce como salada que en los ecosistemas terrestres, puesto que De acuerdo con Surendran et al. (2023) de 1331 artículos de investigación publicados referente a MPI entre 2004 y 2019, solo el 5 % de dichas publicaciones corresponden a estudios de microplásticos en suelos. Por lo cual, resulta fundamental enfrentar este reto al realizar estudios pioneros enfocados en esta problemática en los suelos de nuestro país y así poder presentar una visión holística y globalizada del impacto de este contaminante emergente.

El municipio Zona Bananera ubicada en el departamento de Magdalena es considerada una zona importante en la producción del banano y plátano, cuyo uso de bolsas plásticas dentro de su proceso de producción agroindustriales lo convierte en un área crítica de estudio para el desarrollo de estrategias de mitigación frente a la contaminación por microplásticos. Por ello, al plantear un proyecto con el enfoque de diseñar una metodología específica para el área de estudio, dado que se considera el tipo de microplástico como el tipo de suelo, da lugar a establecer soluciones efectivas y aplicables para la región.

De acuerdo con lo anterior, este proyecto es fundamental en el área de la investigación de microplásticos y en Colombia, puesto que al establecer unos lineamientos y realizar el diseño experimental de una metodología de extracción considerando una características específicas de la zona de estudio como el microplástico de polietileno (PET) y la caracterización del suelo de la finca del municipio de la Zona Bananera, es posible comprender el comportamiento de este contaminante emergente dentro del componente suelo y combatir la contaminación de microplásticos cada vez más presentes en los suelos colombianos. Además, al implementar criterios de sostenibilidad desde la química verde, no solo permite entablar con el propósito de crear soluciones desde la ingeniería ambiental, sino también semi cuantificar la sostenibilidad de un proceso químico-físico que se propone como solución frente a esta problemática.

Uno de los tantos limitantes que se presentan en este tipo de estudios resulta ser la falta de estandarización de estos métodos de extracción y que varían entre estudios, imposibilitando el análisis de comparación de información confiable y verídica. Otros limitantes presentes es el pequeño volumen de microplásticos en las muestras de suelos, así como la dinámica del suelo que difiere según la tipología, aunque de manera general resulta un desafío debido a que “los sustratos

sólidos usualmente se adhieren o envuelven MPI muy pequeñas” (He et al., 2021), lo cual dificulta la implementación de métodos para la identificación y extracción de estos.

Este proyecto puede tener impactos positivos desde lo social, dado que al proponer metodologías de extracción de microplásticos que a futuro pueden implementarse pueden contribuir a mejorar la salud y calidad de vida de las comunidades locales, puesto que abre el camino a proponer soluciones efectivas que contrarrestar los efectos negativos sobre la salud humana. Además, fomenta la participación activa de la comunidad local en la identificación y propuesta de soluciones ante esta problemática evidenciada en las fincas bananeras, contribuyendo así a impulsar la responsabilidad ambiental de la sociedad y concienciar frente a un problema que puede ser invisible ante los demás.

En términos económicos, este proyecto puede generar un impacto indirecto positivo para prevenir pérdidas y costos por la salud ecosistémica y humana de los trabajadores, además que la propuesta de estas metodologías a futuro permitirá entablar soluciones de recirculación y/o reutilización de los microplásticos extraídos para alargar su vida útil, dando oportunidad a nuevos mercados en torno a esta problemática.

En términos ecológicos, este proyecto tiene un impacto significativamente positivo, dado que esta metodología puede contribuir a prevenir la persistencia y la acumulación constante de este contaminante emergente, lo cual ayuda a combatir la contaminación del suelo y acuíferos, así como reducir su incidencia negativa en la biota terrestre. Además, al aplicar criterios de sostenibilidad desde los principios de la química verde se promueve el uso de procesos y materiales más sostenibles y eficientes contribuyendo así a minimizar la generación de residuos durante la elaboración del diseño de la metodología de extracción.

Por otra parte, es importante aclarar que el presente proyecto hace parte de la línea de investigación asociada a los estudios cinéticos y termodinámicos de microplásticos en esferas ambientales del semillero ARPEMS junto con la alianza del semillero Geosuelos. Además, al impulsar la investigación enfocada en el desarrollo de métodos para la identificación, caracterización cuantitativa-cualitativa y extracción de estos desde la ingeniería ambiental se da el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que juegan un papel fundamental. En este sentido, este trabajo aspira a ayudar a cumplir con la meta 3.9 del ODS 3, la cual estipula “para 2030, reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos y la contaminación del aire, el agua y el suelo” (Gamez, 2022), al igual que la meta 12.4 del ODS 12, la cual establece que “de aquí a 2030, lograr la gestión ecológicamente racional de los productos químicos y de todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida, de conformidad con los marcos internacionales convenidos, y reducir significativamente su liberación a la atmósfera, el agua y el suelo a fin de minimizar sus efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente” (Gamez, 2022), así pues surgir como una herramienta para plantear estrategias y alternativas viablemente sostenibles que a futuro sean de gran utilidad para el control de microplásticos, comparación de los grados de contaminación y su impacto producto de las diferentes actividades económicas.

6. Objetivos generales y específicos

6.1. Objetivo general

Diseñar una metodología para la extracción de microplásticos en suelos del municipio de la Zona Bananera, Magdalena considerando criterios de sostenibilidad desde los principios de la química verde

6.2. Objetivos específicos

- I. Identificar las prácticas agrícolas y condiciones ambientales que propician la acumulación y degradación del polietileno en el suelo en las fincas bananeras.
- II. Evaluar las propiedades físicas y químicas de los microplásticos y las muestras del suelo tomadas en la zona de cultivo seleccionada.
- III. Establecer las etapas de extracción química y física de los microplásticos bajo los principios de la química verde y las condiciones encontradas en la evaluación de las muestras recolectadas.

7. Marco de referencia

7.1. Antecedentes

El término “plástico” llegó a conocerse inicialmente en la década de 1630 como una sustancia que puede ser fácil de moldear, el cual con el paso del tiempo fue acogido para describir una amplia gama de productos de polímero sintético de bajo precio y duradero antes de la etapa de comercialización en 1950. Tras este hecho, este producto permitió el crecimiento exponencial del sector de plástico en materia económica a nivel mundial, sin embargo, no se contempló que dicho desarrollo generaría un grado alto de contaminación derivada por plástico, lo hizo que surgiera la necesidad de realizar investigaciones frente a esta problemática, tal como sucedió con el estudio pionera de 1960 relacionada con la ingesta de residuos plásticos por parte de las aves marinas (Surendran et al., 2023; Uribe, 2020).

En ese mismo lapso de tiempo, gracias a una publicación realizado por el Laboratorio de Materiales de la Fuerza Aérea de Estado Unidos de América en 1968, aparece el término de “microplásticos” para definir la deformación de un material plástico como respuesta ante un fenómeno deformativo, no obstante esto cambió en 1972 con el descubrimiento de piezas plásticas de tamaño micro en el ambiente acuático flotando, puntualmente en la superficie del Mar de Sargazos, único mar sin costa ubicado en medio del Giro del Océano Atlántico Norte, así resaltando el inicio de la investigación de microplásticos en el mar (Blair Crawford y Quinn, 2017).

Más adelante, gracias a Thompson et al. (2004) se incluyó una definición más moderna del término que resultó siendo adoptado por las comunidades científicas, lo que permitió ahora reconocer universalmente a los microplásticos como aquellas partículas de plástico de menos de 5 mm de tamaño. A partir de ese momento, se despertó el interés científico por investigar la problemática causada por estas pequeñas piezas plásticas en los ecosistemas marinos, dando el inicio para las futuras investigaciones que se han vuelto cada vez más amplias en cuanto al estudio de los microplásticos en otros tipos de ecosistemas como los terrestres, glaciares y la atmósfera.

7.2. Estado de Arte

Para la elaboración del estado del arte del presente proyecto, se reconoció la importancia de consolidar información verídica en artículos científicos y libros académicos que tuvieran relación con el tema de microplásticos, su comportamiento ambiental puntualmente en los ecosistemas terrestres, las metodologías de identificación, cuantificación y extracción de los microplásticos, además de los temas relacionados con la química verde, la construcción de la estrella verde y los criterios de sostenibilidad a partir de la consulta en las diferentes bases de datos de la Universidad El Bosque tales como Scencedirect, ProQuest, SpringerLink, Engineering Village, Scopus y Taylor & Francis.

Inicialmente, se realizó una revisión exhaustiva referente a las generalidades de los microplásticos como tema general del proyecto, donde se examinó el libro académico de Surampalli et al. (2018), el cual ofrece una amplia información sobre todos los segmentos relacionados a la ingeniería ambiental como es la legislación ambiental, evaluación de impacto ambiental, control y gestión de contaminación atmosférica, tratamiento del agua potable, tratamiento y reutilización de aguas

residuales, gestión de recursos sólidos y peligrosos, vigilancia y mediciones ambientales y residuos emergentes en el ambiente; este último tramo incluye información general de los microplásticos y los métodos de identificación y prevención de estos.

En cuanto a la revisión de libros académicos, también se analizaron los libros académicos de Surampalli et al. (2018) y Rocha-Santos y Duarte (2017), las cuales proveen información general en cuanto a los microplásticos, dado que abarca diversas temáticas como sus fuentes de contaminación, el recorrido histórico del plástico y del microplástico, la legislación existente referente al caso, sus propiedades fisicoquímicas, su proceso de degradación y las técnicas de identificación. De este modo, con estos textos se permite entablar una mayor confiabilidad en la información sobre los aspectos generales a entender de la temática y de cual se partirá para realizar la investigación.

Por otra parte, se analizó el libro de acceso directo de Bank (2022), con el cual es posible examinar a fondo la contaminación plástica global en diferentes ecosistemas, resaltando el capítulo 4 enfocado a los ambientes terrestres, donde abarca temáticas enfocadas a las fuentes generadoras de microplásticos en suelos destinados agricultura y zona urbana, el destino y la dinámica del transporte de esto influenciados por sus características y condiciones generales del ecosistema, los impactos potenciales en la salud humana, ecosistémica y red alimentaria.

7.2.2. Investigaciones científicas nacionales

A nivel nacional, se revisaron dos artículos relacionados con los microplásticos, los cuales aunque no se relacionen directamente con el proyecto, resultan ser fuentes de información relevantes para la elaboración de algunas etapas de la investigación.

Primero, se encuentra el estudio realizado por Garcés-Ordóñez, et al. (2019) en colaboración con el INVEMAR y Ministerio de Ambiente, evalúa los impactos de la contaminación por la basura marina y microplásticos sobre los suelos de manglares de la Ciénaga Grande de Santa Marta, por medio de la identificación espectroscópica y cuantificación de los microplásticos presentes en las seis estaciones diferentes estipuladas para el desarrollo del estudio y a su vez, clasificándolos acorde a su forma (espuma, filamentos, films y fragmentos), todo mediante análisis visual a nivel macro. Aunque el estudio no va enfocado al tipo de suelo de interés en el desarrollo de la presente investigación, ofrece información clave sobre la presencia de estas micropartículas en la CGSM y los métodos empleados para la detección cualitativa y cuantitativa.

Por otra parte, el estudio realizado por Rusinque-Quintero et al. (2022), pretendía evaluar y zonificar los riesgos ambientales derivados de la contaminación por microplásticos en el complejo lagunar y Mar Caribe, esto permitió comprender mejor las alteraciones negativas que pueden llegar a padecer diferentes esferas ambientales con la presencia de este contaminante emergente. Dentro de sus conclusiones, se obtuvo que la presencia de microplásticos representaba un riesgo ambiental alto y crítico en zonas como la Ciénaga Grande Santa Marta, así pues dicha información permite confirmar y establecer la importancia de formular soluciones desde la ingeniería ambiental.

7.2.3. Investigaciones científicas internacionales

A nivel internacional, se encontraron artículos relacionados con las diferentes metodologías de extracción basado en la separación fraccionada con el uso de soluciones de extracción y aceite, de los cuales se destacan dos:

El estudio realizado por Yuan et al. (2022), en el que se llevó a cabo el desarrollo de un protocolo experimental por etapas para conseguir la separación fraccionada de diferentes tipos de MP en varios suelos y matrices de sedimentos mediante el uso de dispositivo extractor de microplásticos con diversas soluciones de extracción tradicionales y una diferente, la cual incluye aceite; más las condiciones óptimas para lograrlo. Dentro de sus conclusiones, obtuvieron que el aceite implementado dentro de las soluciones mejoró la eficiencia de separación con ciertos tipos de polímeros, lo cual estipula la importancia de la caracterización de los microplásticos a emplear y elaborar metodologías enfocadas a los diferentes polímeros.

El estudio realizado por Kononov et al. (2022), donde se desarrolló un método sencillo y económico para extraer microplásticos del suelo utilizando la flotabilidad del aceite de canola y el proceso de separación por densidad utilizando cloruro sódico (NaCl), sumado a la adaptación del método de incineración. Como conclusión, se obtuvo que dicho proceso propuesto y elaborado fue eficaz para la extracción de los microplásticos, específicamente para polietileno de baja densidad (LDPE) y polipropileno (PP), además resulta ser más sensible según el tipo del suelo y su caracterización. Esto permite obtener información real sobre la eficacia de la formulación de metodologías puntuales para las bolsas de polietileno y el suelo del municipio de la Zona Bananera.

7.3. Marco Conceptual

A continuación, se presenta una diversidad de conceptos claves definidos importantes para el desarrollo y entendimiento de la temática del proyecto.

Por parte de la Organización Internacional de Normalización (ISO, en sus siglas en inglés) ha definido el **plástico** como un material compuesto de un polímero de gran tamaño molecular, el cual será utilizado en alguna etapa de su transformación en productos finales (Gazal y Gheewala, 2020). También, se emplea mucho este término para definir aquellos “materiales poliméricos que pueden contener otras sustancias para mejorar el rendimiento y/o reducir costos” (Vert et al., 2012)

De acuerdo con la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC, en sus siglas en inglés), los **polímeros** hacen referencia a las sustancias compuestas de cadenas largas de moléculas de masa molecular elevada, conocidas como macromoléculas, cuya estructura comprende la repetición múltiple de unidades moleculares con masa molecular baja (Vert et al., 2012). Estas se pueden dividir en **polímeros sintéticos** empleados para la elaboración de materiales ligeros con bajo costo y **polímeros naturales**, los cuales constituyen la gran mayoría de las estructuras de los tejidos vivos como proteínas, almidón, celulosa y ADN (Vert et al., 2012).

El **polietileno (PE)** es considerado uno de los polímeros sintéticos más empleado en las diferentes industrias, debido a su versatilidad y facilidad de procesamiento dados por los petroquímicos utilizados en su elaboración (Da Costa et al., 2018). Este se expresa con la reacción C_nH_{2n} , y se divide en diferentes categorías basada en su densidad, siendo las más representativas el polietileno de alta

densidad (HDPE), polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) y polietileno de baja densidad (LDPE) (Blair Crawford y Quinn, 2017).

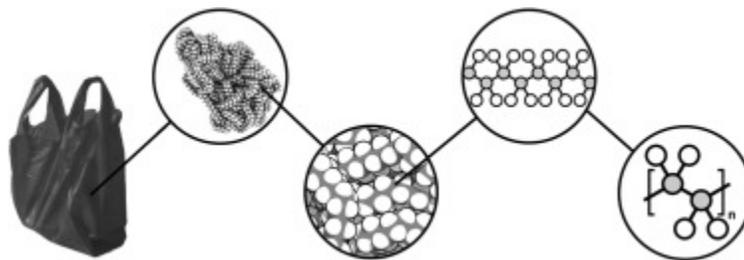


Figura 1. Bolsa de polietileno compuesta por grandes cadenas de polímeros formadas a su vez por muchos monómeros de etileno.

Nota: (Blair Crawford y Quinn, 2017)

Los **microplásticos (MPI)** se definen como fragmentos o partículas plásticas con diámetro menor a 5mm que según su origen y aplicaciones se pueden clasificar en: microplásticos primarios o secundarios. Los **microplásticos primarios** son aquellas partículas fabricadas intencionalmente de dicho tamaño para su uso directo en diversos campos médicos e industria cosmética como los exfoliantes faciales, productos de aseo y crema dental, así como ser fuente de materia prima para la producción de artículos de plástico más grande (Surampalli et al., 2018).

Los **microplásticos secundarios** resultan ser aquellas partículas producto de la degradación y descomposición de los desechos plásticos más grandes en el ambiente por la exposición prolongada a diferentes condiciones ambientales como la radiación solar, temperaturas altas, abrasión excesiva, acción del viento, entre otras; que ocasionan la fragmentación de dichos materiales plásticos de mayor tamaño a micropartículas (Surampalli et al., 2018). Dependiendo de la fuente de origen, se puede llegar a clasificar en polietileno (PE), polipropileno (PP), poliamida (PA), cloruro de polivinilo (PVC), poliestireno (PS), poliuretano (PUR) y tereftalato de polietileno (PET) (Rezania et al., 2018)

Por otra parte, los microplásticos poseen características particulares que facilita su distribución en los diferentes ambientes como lo es su forma, la cual se clasifica en cinco grupos: **espuma** (espuma de poliestireno), **fibras** (hebras o fibras plásticas uniformes), **fragmentos** (partículas con bordes dentados), **microgránulos** (partículas duras y redondeadas) y **películas** (fibras plásticas bidimensionales delgadas) (Rezania et al., 2018).



Figura 2. Clasificación de microplásticos según su forma estandarizada y sus aplicaciones, mostrando microgránulos, perlas, fibras, espuma y fragmento
Nota: (Priya et al., 2022)

Con relación a los polímeros, se establece que por las condiciones ambientales puede suceder la **degradación** de estos mismos, proceso que según la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC, en sus siglas en inglés) se define como las alteraciones químicas en la estructura de la cadena polimérica, provocando disminución en la masa molar y cambios indeseados en sus propiedades útiles como material (Vert et al., 2012). También, se habla de **fragmentación** cuando existe una ruptura del material completo en partículas independientemente del mecanismo y tamaño de estos pedazos fragmentados (Vert et al., 2012).

La **espectroscopia infrarroja (IR)** es considerada una técnica espectroscópica vibracional que proporciona información detallada sobre los enlaces específicos de los plásticos bajo la interacción entre la radiación electromagnética (REM) y las regiones infrarrojas. Como resultado, se obtiene una huella molecular del material sometido a evaluación, donde los enlaces químicos vibran y absorben la radiación a frecuencias que coinciden sus modos de vibración representados en la huella (Rees, 2010).

Por último, ante la contaminación derivada de los procesos químicos altamente peligrosos alrededor del mundo, surge como alternativa la **química verde**, rama de la química que tiene como fin la reducción y/eliminación del uso de sustancias químicas peligrosas en un proceso químico, así como la generación de productos y residuos peligrosos o tóxicos abarcando desde las materias primas, aspectos del proceso, fuentes de energía y los tipos de procesos con el propósito de desarrollar mejores procedimientos químicos permitiendo reducir los impactos negativos para la salud humana y ambiente (Ahluwalia, 2012; Doble et al., 2007)

7.4. Marco Teórico

En este apartado, se dará a conocer las teorías relacionadas al comportamiento de los microplásticos en la matriz suelo, partiendo del reconocimiento de las fuentes generadoras de este contaminante en los ecosistemas terrestres puntualmente referente a los suelos destinados para la actividad agrícola. Una vez ingresan al suelo, se establece el punto de partida del proceso de degradación y descomposición de los plásticos de mayor tamaño, dando origen a la presencia de microplásticos en estos ambientes. Continuamente, se presenta la teoría referente a la migración y acumulación de estas partículas pequeñas en dichos suelos, haciendo énfasis en la dinámica del suelo y los organismos dentro de este. Además, se destaca la información referente a los efectos nocivos de los microplásticos dada sus características y persistencia en los diferentes ámbitos (ecológicos y sociales). Además, para establecer soluciones, se exponen las teorías referentes a las metodologías de identificación, cuantificación y extracción de los microplásticos, así como sobre la construcción de la estrella verde dentro de la química verde para dar cabida a los criterios de sostenibilidad del diseño propuesto en cuestión.

7.4.1. Fuentes y vías de liberación de microplásticos en los suelos

La presencia de microplásticos en los suelos destinados a la actividad agrícola se debe al desenlace de una amplia gama de diferentes fuentes y vías de liberación de plástico como la aplicación de biosólidos derivados de lodos depuradores del tratamiento de aguas residuales, puesto que gran parte del material retenido en el proceso pasa a ser lodos sólidos que resultan ser utilizados como fertilizante para el suelo (Bank, 2022; Yang et al., 2022). Sumado a esto, el riego artificial con aguas superficiales, subterráneas contaminadas y aguas residuales purificadas se ha estipulado como un posible vía de liberación de este contaminante emergente (Jia et al., 2022).

Asimismo, una fuente de propagación de microplásticos es el uso de herramientas poliméricas como las películas plásticas empleadas para el cubrimiento de los cultivos de los diferentes productos, las cuales se incrustan en el suelo y por condiciones ambientales, con el transcurso del tiempo se desintegran en microplásticos secundarios (Yang et al., 2022; Zhang y Liu, 2018). Además, la mala gestión de los residuos plásticos (bolsas plásticas, mallas sintéticas, etc) empleados durante el proceso agrícola conlleva a ser una fuente primordial de este contaminante, debido a la descomposición de los desechos poliméricos que a raíz de los factores ambientales a los que se encuentran expuesto, se trituran hasta llegar a partículas pequeñas de plásticos (Bank, 2022; Priya et al., 2022). Así como fuente de MP secundarios se encuentra el desgaste de las llantas vehiculares de los transportes de carreteras, el cual desprende estas partículas (Koelmans et al., 2016).

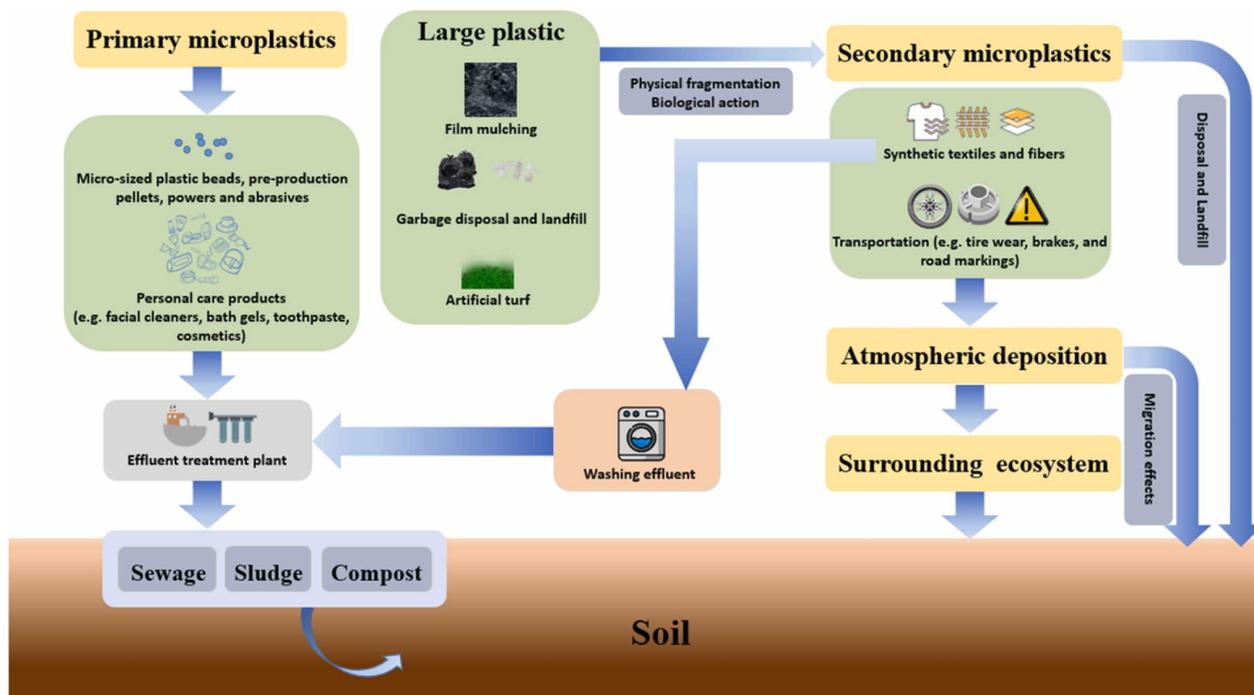


Figura 3. Fuentes de contaminación de los microplásticos para el suelo

Nota: (Yang et al., 2022)

7.4.2. Descomposición y degradación de microplásticos en la matriz suelo

De manera general, los microplásticos llegan a los ambientes terrestres por medio de procesos físicos y químicos, tales como la trituración física, envejecimiento químico, degradación y biodegradación, entre otros (Yang et al., 2022). La **degradación** se da principalmente de manera **abiótica**, es decir, la ruptura de materiales por acciones de factores ambientales como la radiación ultravioleta, la intemperie, las altas temperaturas, la acción del viento, las precipitaciones, las fuerzas mecánicas y los procesos biológicos de los organismos del suelo que llegan a ocasionar algún efecto degradativo sobre el material (Blair Crawford y Quinn, 2017).

De acuerdo con lo anterior, la descomposición de los plásticos grandes se puede dar por la acción de la luz, conocida como **degradación fotooxidativa**, la cual sucede directamente sobre los residuos plásticos mal gestionados dispuestos en la superficie del suelo, puesto que están expuestos a grandes cantidades de radiación de la luz ultravioleta (UV) de alta intensidad, siendo susceptibles a fragmentarse por los grupos fotoreactivos presentes en su composición que llegan a absorber dicha radiación, provocando así la ruptura de enlaces químicos (Blair Crawford y Quinn, 2017). Así como, se presenta la **degradación térmica**, referente al proceso de ruptura química dada por los cambios de temperatura en la zona mediante una reacción termooxidativa, jugando un papel importante la resiliencia y propiedades térmicas del material en descomposición (Blair Crawford y Quinn, 2017).

Por otra parte, la **degradación mecánica** resulta ser el tipo de degradación con mayor relevancia al hablar de la descomposición física de los microplásticos una vez ingresan al suelo, puesto que los desechos plásticos sufren un estrés mecánico producto de la abrasión mecánica y compresión de los agregados del suelo, la fuerza ejercida por rocas u otros minerales presentes, la tensión mecánica, los

procesos biológicos de los microorganismos y la interacción con las aguas subterráneas (Blair Crawford y Quinn, 2017).

7.4.3. Migración y acumulación de microplásticos en el suelo

La migración de microplásticos en el suelo sucede de forma vertical como horizontalmente, lo cual depende de diferentes factores como las características del suelos, medidas agrícolas, procesos de las plantas de cultivo, complejidad de la cadena alimenticia y actividades de los macro y microorganismos del suelo (Yang et al., 2022). Las plantas juegan un papel principal en el transporte de MP, puesto que por medio de los procesos de proliferación en las raíces (bioturbación), estos se transfieren a las hojas de las plantas, también el destino de este contaminante emergente puede verse influenciado por los procesos agrícolas relacionados a la preparación de la tierra como la labranza mecánica (agregación), ocasionando así el movimiento del suelo involuntariamente y por ende, de los MP presente en él (Surendran et al., 2023).

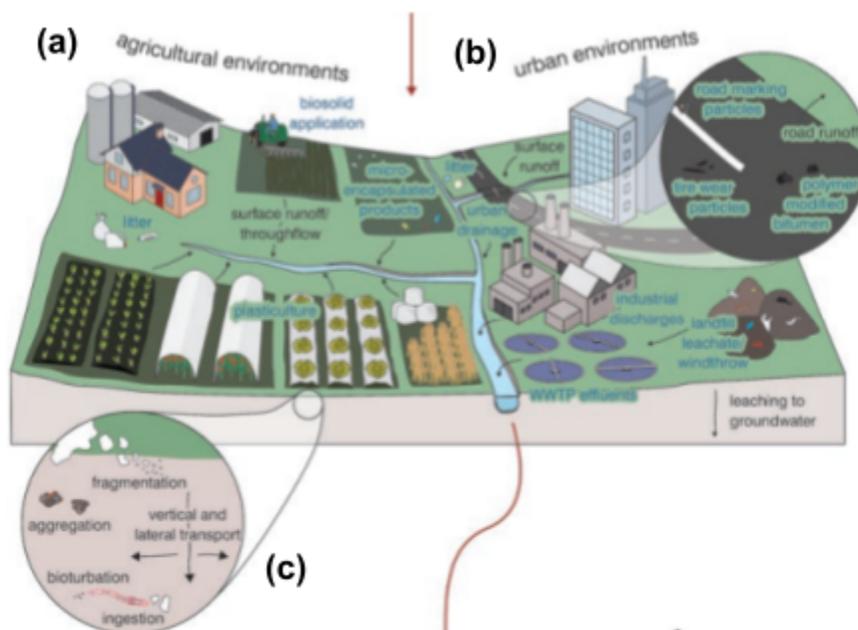


Figura 4. Diagrama conceptual donde se exponen las fuentes primarias de liberación de microplásticos en (a) los sistemas agrícolas y (b) las zonas urbanas, junto con (c) el proceso de migración y acumulación de MP.

Nota: (Bank, 2022)

Por otra parte, la acumulación de microplásticos puede verse influenciados por la biota del suelo durante los procesos de ingestión y excreción, ya bien sean microorganismos como las lombrices de tierras que ingieren los MP del suelo o macroorganismos como los mamíferos excavadores (topo y tuzas) que contribuyen a la fragmentación, abrasión y transferencia de MP (Priya et al., 2022; Surendran et al., 2023). En esta misma línea, el movimiento vertical de los microplásticos en el suelo (Figura 4) se puede dar por la ingestión y egestión de algunas especies de lombriz de tierra junto con actividades de manejo agrónomo, asimismo se ha evidenciado que el tamaño de los microplásticos y

las características del suelo, como MP pequeñas, partículas grandes del suelo y materia orgánica disuelta (DOM) contribuyen a la migración vertical (Surendran et al., 2023; Yang et al., 2022).

Además, se ha evidenciado que los seres humanos hacen parte del proceso de transporte y acumulación de MP, debido a que por el consumo de alimentos contaminados por microplásticos mediante la cadena alimenticia, estos llegan a acumularse en el tracto intestinal u otras partes (Surendran et al., 2023).

7.4.4. Métodos analíticos de identificación y cuantificación

En cuanto a la detección cualitativa y cuantitativa de los microplásticos en los ecosistemas terrestres, se ha determinado una brecha cada vez más amplia de información, debido a que los estudios enfocados en dichos métodos varían según los grupos de investigación, imposibilitando así la estandarización de un método disponible para cuantificar e identificar los microplásticos en el suelo (Surendran et al., 2023). La **identificación y cuantificación de los microplásticos** parte inicialmente con la **separación por densidad** del MP y suelo, proceso que consiste en separar las partículas en función a su diferencia de densidad, donde los microplásticos resultan tener menor densidad que los agregados del suelo. Seguidamente, se hace la correcta caracterización de los MP por medio de las **técnicas de microscopía avanzada** como la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) y Raman, con las cuales será posible identificar las características morfológicas y propiedades químicas de estos, mientras que para la cuantificación se ha establecido el uso de una tecnología avanzada como es **el análisis de imágenes hiperespectrales**, donde se cuantifican los MPI según su firma espectral (Surendran et al., 2023).

7.4.5. Principios de química verde

La química verde se define como la síntesis química benigna del ambiente, el cual se logra siguiendo los doce principios establecidos por Paul T. Anastas y John C. Warner en 1998 (Ahluwalia, 2012), siendo estos (Tabla 1):

Tabla 1.
Principios de la química verde

Principio	Nombre	Descripción
Principio 1	Prevención	Es mejor prevenir los residuos que tratarlos o limpiarlos una vez creados
Principio 2	Economía atómica	Los métodos sintéticos deben ser diseñados de manera que todos los materiales utilizados se incorporen al producto final de forma eficiente
Principio 3	Síntesis química menos peligrosa	Los métodos sintéticos deben ser diseñados para utilizar y generar sustancias con baja o nula toxicidad tanto para la salud humana como el ambiente

Principio 4	Diseñar productos químicos más seguros	Los productos químicos deben diseñarse para realizar la función deseada minimizando al mismo tiempo su toxicidad
Principio 5	Disolventes y sustancias auxiliares más seguros	Evitar o minimizar el uso de sustancias auxiliares (disolventes, agentes de separación, entre otros) siempre que sea posible y ser inocuo cuando se utilice
Principio 6	Aumentar la eficiencia energética	Es esencial considerar los requisitos energéticos de los procesos químicos por sus impactos ambientales y económicos, y se deben minimizar. Si es posible, los métodos sintéticos deben realizarse a temperatura y presión ambiente
Principio 7	Utilizar materias primas renovables	Una materia prima debe ser renovable en lugar de agotarse siempre que sea técnica y económicamente viable
Principio 8	Reducir los derivados	Se debe reducir al mínimo o evitar la derivatización innecesaria (grupos bloqueantes, protección/desprotección y modificaciones temporales) por generar residuos y reactivos adicionales
Principio 9	Catalizadores	Los reactivos catalíticos (lo más selectivos posible) son superiores a los reactivos estequiométricos.
Principio 10	Diseño para la degradación	Los productos químicos deben ser diseñados para descomponerse en productos degradados inofensivos al final de su vida útil, sin persistir en el ambiente
Principio 11	Análisis en tiempo real para la prevención de la contaminación	Es fundamental desarrollar metodologías analíticas adicionales que permitan el seguimiento y control del proceso en tiempo real, antes de que se generen sustancias peligrosas
Principio 12	Química más segura para la prevención de accidentes	Las sustancias y sus formas utilizadas en un proceso químico deben seleccionarse para minimizar la probabilidad de accidentes químicos, incluidas liberaciones, explosiones e incendios

Nota: (Ahluwalia, 2012 & Doble et al., 2007)

7.5. Marco Normativo

En cuanto al marco normativo, se definió el marco normativo a nivel nacional según políticas, leyes, decretos y resoluciones relacionadas a los microplásticos o plásticos en general vigentes en Colombia, de las cuales se destaca:

Tabla 2.
Regulaciones vigentes a nivel nacional sobre plásticos

Normativa	Expedición	Descripción
CONPES 3874 de 2016	Departamento Nacional de Planeación	Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos
Ley 2232 de 2022	Congreso de la República de Colombia	Reducción gradual de la producción y consumo de ciertos productos plásticos de un solo uso
Decreto 2198 de 2017	Presidente de la República de Colombia	requisitos para aplicar las tarifas diferenciales del impuesto al consumo en las bolsas plásticas que promuevan soluciones ambientales, así como las condiciones en las que no se aplica dicho impuesto
Resolución 1407 de 2018	Presidente de la República de Colombia	Reglamenta la gestión ambiental de los residuos de envases y empaques de papel, cartón, plástico, vidrio, metal y se toman otras determinaciones

Nota: Elaboración propia

A partir de estas normativas, se destaca que el **CONPES 3874 de 2016** permite promover la educación y la cultura ciudadana en el tema de gestión de residuos, así como crear un entorno institucional adecuado para la coordinación entre actores que fomenten la eficiencia en la gestión de residuos sólidos. Adicionalmente, las medidas tendientes que se establecen en la **Ley 2232 de 2022** permiten conocer los plásticos de un solo uso que entrarán en prohibición y sustitución gradual en el territorio nacional enlistados en el artículo N° 5 de la ley, como las bolsas plásticas. Además, el **Decreto 2198 de 2017** distingue los requisitos de aplicación de las tarifas diferenciales del impuesto

de las bolsas plásticas que se utilizan para cargar o llevar productos enajenados por los establecimientos comerciales. Por otra parte, con la gestión integral de residuos sólidos la **Resolución 1407 de 2018** fomenta el fortalecimiento del reciclaje en el país y la responsabilidad extendida de los productores para gestionar correctamente los residuos generados durante todo su ciclo de vida.

7.6. Marco Geográfico

Al norte del departamento del Magdalena, se encuentra ubicado el municipio de Zona Bananera, específicamente entre el piedemonte de la Sierra Nevada y la Ciénaga Grande de Santa Marta, a una altura de 30 msnm, cuya división política administrativa radica en 14 corregimientos que lo conforman, siendo estos: Sevilla, Riofrío, Guamachito, Soplador, Palomar, Varela, La Gran Vía, Santa Rosalía, Orihueca, Guacamayal, Tucurinca, Candelaria, San José de Kennedy y Julio Zawady (José et al., 2013).

Este representa el 1.9% del territorio departamental del Magdalena, con una extensión total de 47.971 ha, de las cuales el 76.3% es de vocación agrícola y el 22.4% restante pecuaria (Camargo Caicedo et al., 2020). Además, acorde a los datos del DANE, la Zona Bananera cuenta con 60.941 habitantes de los cuales el 93,5% están asentados en la zona rural, mientras que solo el 6,5% restante en la cabecera municipal (Valencia y De Jesús Martínez, 2018).

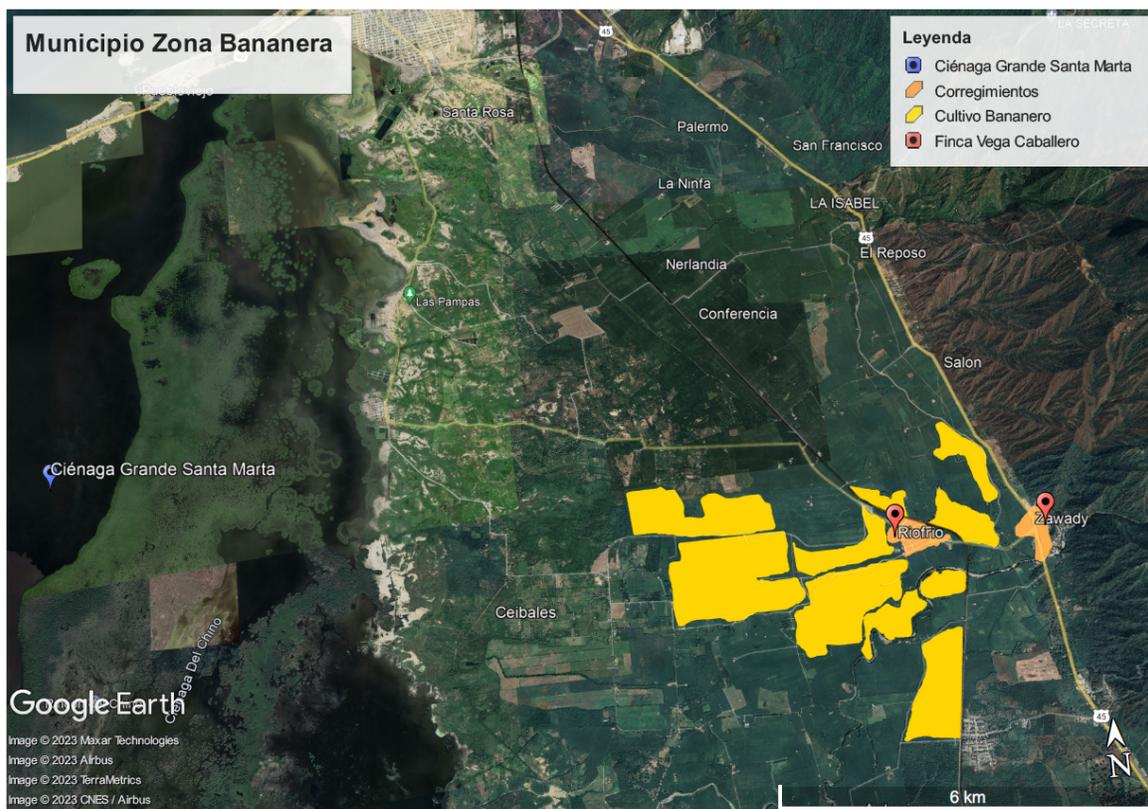


Figura 5. Fotomapa del municipio Zona Bananera, Magdalena. Elaboración propia

La actividad productiva del Magdalena se centra en las actividades agrícolas asociadas al cultivo de banano y palma africana de aceite, destacando la Zona Bananera como principal productor de banano con destino a exportación, puesto que cuenta con 13.300 hectáreas cultivadas para el año 2017, equivalente al 30% de su extensión como municipio (MINAGRICULTURA, 2017).

En materia ambiental, existe una creciente preocupación por la carencia de un servicio de recolección de basuras y relleno sanitario, donde el 19% es recolectada por los carros de aseo en contraste con el 44% de estos que se queman y el 37% se dispone inadecuadamente, resultado ser arrojado al río o caminos (Alcaldía Municipal Zona Bananera, 2017).

7.7. Marco Institucional

Como parte del proyecto se tendrán en consideración las siguientes instituciones u organizaciones relacionadas con el tema o la zona de estudio.

A nivel nacional, se tiene en cuenta el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (**Minambiente**), como actor fundamental en la coordinación del ordenamiento territorial ambiental desde la gestión ambiental y de los recursos naturales. A nivel regional, se cuenta la Corporación Autónoma Regional del Magdalena (**CORPAMAG**), quien es responsable de la jurisdicción de la Ciénaga Grande de Santa Marta y todo lo relacionado con esta en temas de carácter normativo público, administración ambiental del recursos y garantía de un desarrollo sostenible desde los aspectos ecológicos, sociales y económicos. A nivel local, se contempla la **Alcaldía de Zona Bananera**, cuyo objetivo es promover el desarrollo integral del municipio al implementar medidas que mejoren la calidad de vida de las comunidades y por ende, se asegure una sostenibilidad ambiental.

Por otra parte, a nivel institucional, se contempla la ayuda del **IDEAM** (Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) y el **INVEMAR** (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés), quienes juegan un papel importante en la investigación de las zonas caribeñas y ecosistemas acuáticos, así pues al tratarse de un municipio aledaño a la Ciénaga Grande de Santa Marta, ayudarán en ofrecer información referente a las características de la zona y sus preocupaciones ambientales, así como funcionan como actores principales interesados en al investigación de los microplásticos, a pesar de que se trate de una esfera ambiental diferente durante el proyecto, siempre existirá la conexión entre la matriz del suelo y agua, por consiguiente, sucederá la contaminación por MPs. Asimismo, el **IGAC** (Instituto Geográfico Agustín Codazzi), quien provee información y herramientas relacionadas al suelo como la guía de muestreo de suelo.

Por último, a nivel académico y por tratarse de un proyecto de grado, se tiene en cuenta a la **Universidad El Bosque**, cuyo objetivo central como institución educativa es formar estudiantes con un enfoque que articule el desarrollo, innovación con salud y calidad de vida.

8. Metodología

8.1. Marco metodológico

La presente investigación se efectuará desde un enfoque mixto dado que se involucra la relación y análisis de datos cuantitativos y cualitativos, cuya integración será continua durante el desarrollo del proyecto con el fin de lograr un mejor entendimiento ante la problemática y la metodología propuesta una vez culminado el estudio (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2020).

Además, esta investigación partirá con el primer objetivo específico con un alcance descriptivo, puesto que describe un problema a investigar de una zona y contexto determinado tal como sucede en este caso con el municipio de la Zona Bananera de Magdalena y la constante presencia de basura plástica que se transforma en microplásticos una vez ingresan al suelo y agua, también con el segundo objetivo se tendrá un alcance explicativo, debido a que se centra en explicar las condiciones del suelo del área de estudio y comprenderá el análisis físico y químico de los microplásticos presentes en este. Por último, se contempla con el tercer objetivo un alcance exploratorio y correlacional, puesto que se pretende estudiar un problema poco estudiado como resulta ser las metodologías de extracción de microplásticos en los suelos agrícolas con el fin de obtener información más detallada y completa dentro de un contexto particular, sumado a comprender la relación existente entre las propiedades del suelos y microplástico para llevar de forma exitosa el proceso químico y físico de extracción (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2020).

8.2. Plan de Trabajo

Para alcanzar los objetivos planteados, se lleva a cabo un plan de trabajo estipulado con cierta secuencialidad para cumplir con el proyecto. En este sentido, se ejecutará las actividades de forma adecuada siguiendo el plan formulado, el cual parte desde la etapa de diagnóstico donde se determinarán e identificarán las dinámicas económicas, sociales y ecológicas asociadas al manejo de las bolsas plásticas empleadas durante el desarrollo de la actividad agrícola del cultivo de banano, continuamente se identificarán las propiedades físicas y químicas del suelo y microplásticos de la zona de estudio a fin de reconocer las condiciones del problema a investigar y obtener un contexto más detallado del suelo a emplear durante la propuesta. Finalmente, se ejecutarán los ensayos de laboratorio donde se determinarán las fases y lineamientos para realizar una metodología de extracción de microplásticos adecuada para el tipo de MP y la caracterización del suelo siguiendo un marco de sostenibilidad dado por la química verde y la estrella verde.

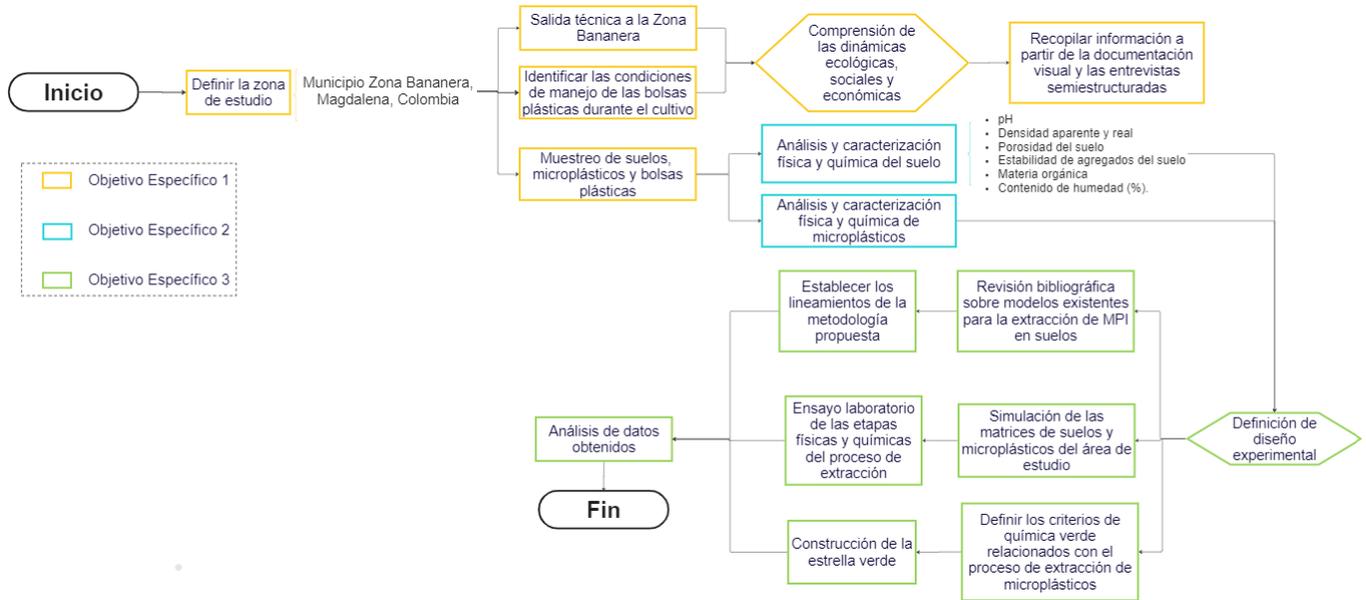


Figura 6. Plan de trabajo. Elaboración propia

8.3. Procedimiento Metodológico

Para establecer una mejor secuencia de la metodología, se establecieron los procedimientos por cada objetivo específico.

8.3.1. Objetivo Específico 1

Inicialmente, para el primer objetivo se identificó cómo las prácticas agrícolas y condiciones ambientales contribuye en la acumulación y degradación del polietileno en el suelo en las fincas bananeras, para lo cual se realizaron las siguientes actividades:

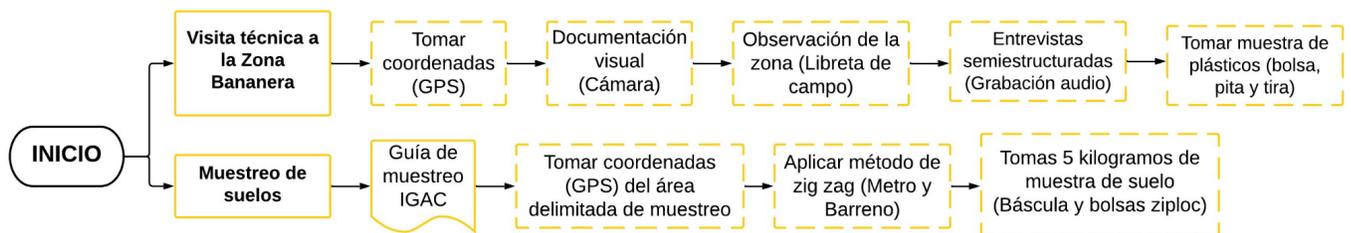


Figura 7. Metodología objetivo específico 1.

Nota: Elaboración propia adaptado de (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2017 y Hernández-Sampieri y Mendoza, 2020)

8.3.1.1. Visita técnica a la finca bananera

En un principio, se realizó la visita técnica a la finca bananera “Vega Caballero” (10°53’57.8”N - 74°10’09.7”O) (Figura 8), ubicada dentro del complejo de parcelas pertenecientes al municipio de la Zona Bananera, donde a partir de las técnicas observación directa y documentación visual fue

posible efectuar el diagnóstico del área de estudio, al mismo tiempo, se llevó a cabo las entrevistas semiestructuradas dirigidas a los trabajadores y gerente de la finca siguiendo una serie de preguntas previamente establecidas. Esto se hace con el fin de comprender y obtener información acerca del proceso productivo del banano, del uso y diversidad de los productos plásticos empleados durante todo el proceso para poder construir el ciclo de vida de la bolsa plástica dentro del sistema productivo, la existencia de un plan de manejo de residuos plásticos y el estado del suelo en cuanto a la contaminación por plásticos. También, se tomó una muestra de cada producto plástico empleado en la actividad agrícola para ser analizada en el laboratorio posteriormente.

8.3.1.2. Muestreo de suelos

Durante la visita técnica, bajo la guía de muestreo del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), se realizó la toma de muestra del suelo agrícola para ser sometida a análisis en el laboratorio más adelante. En este sentido, se delimitó la zona de muestreo donde se aplicó el método de zig zag para el muestreo.

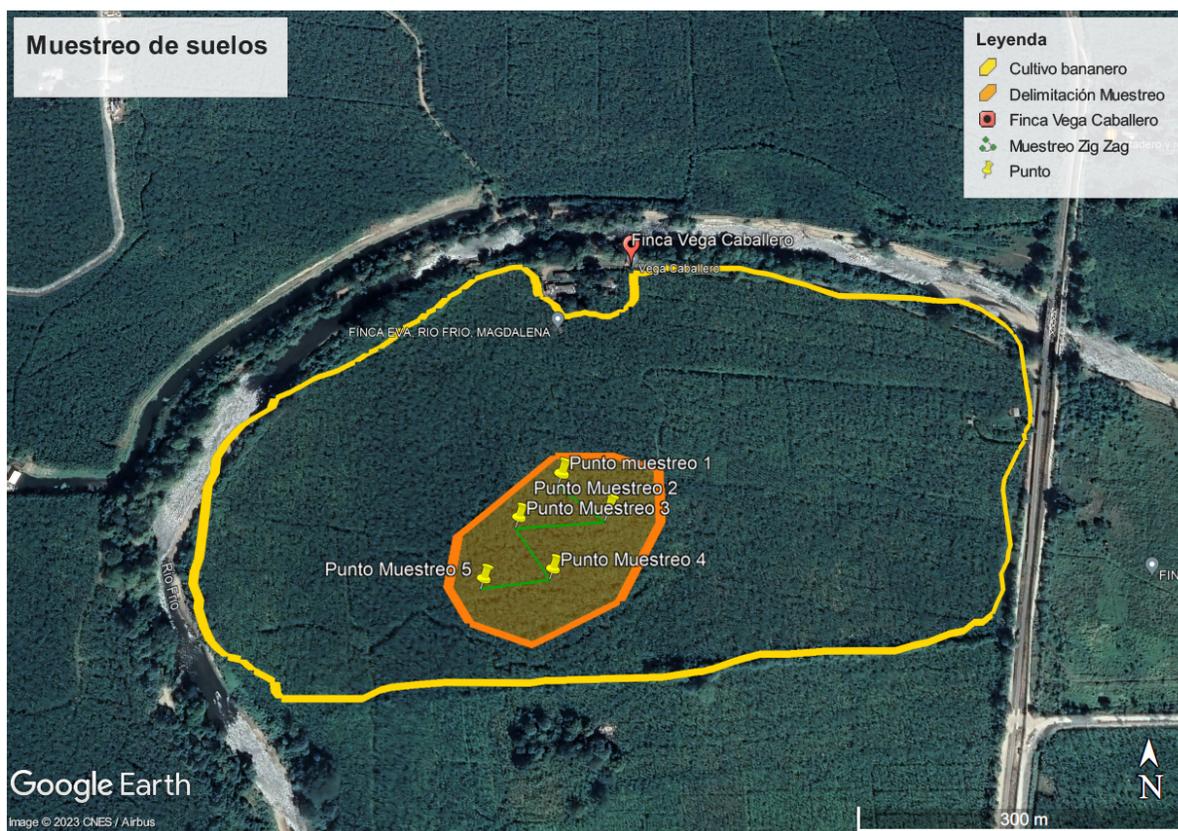


Figura 8. Evidencia satelital del muestreo a partir del método zigzag en la finca bananera en Google Earth (Versión7,3). Elaboración propia

Inicialmente, se escogió un lote de la finca para el muestreo partiendo de un punto inicial (Punto 1: 10°53'50.46"N - 74°10'12.17"O), donde con la ayuda de un barreno se excavó a una profundidad de 20 cm en forma *V*, retirando únicamente 5 cm de cobertura de suelo para ser depositada posteriormente en un balde seco y limpio. Este procedimiento se repitió de manera de zig zag desde

el primer punto hasta el quinto punto de recolección (Punto 2: 10°53'49.34 "N - 74°10'10.77"O; Punto 3: 10°53'49.16"N - 74°10'13.41"O; Punto 4: 10°53'47.64"N - 74°10'12.38"O; Punto 5: 10°53'47.34"N - 74°10'14.38"O) para obtener 5 submuestras y poder mezclarlas e integrarlas. Luego, se tomaron dos muestras diferentes con ayuda de una báscula en bolsas de ziploc: 1 kilogramo para la caracterización fisicoquímica del suelo a laboratorio y 4 kilogramos de muestra de suelo para la ejecución del objetivo específico 2 y el ensayo experimental del objetivo específico 3. Cada muestra se rotuló con la fecha, hora, coordenadas, estado del suelo, lugar, persona encargada de la toma de muestra y observaciones.

8.3.2. Objetivo Específico 2

Posteriormente, se realizó el análisis de las propiedades físicas y químicas seleccionadas de la muestras de suelos tomada en la zona de cultivo, asimismo la caracterización de los microplásticos presentes en esta, para lo cual se realizarán las siguientes actividades:

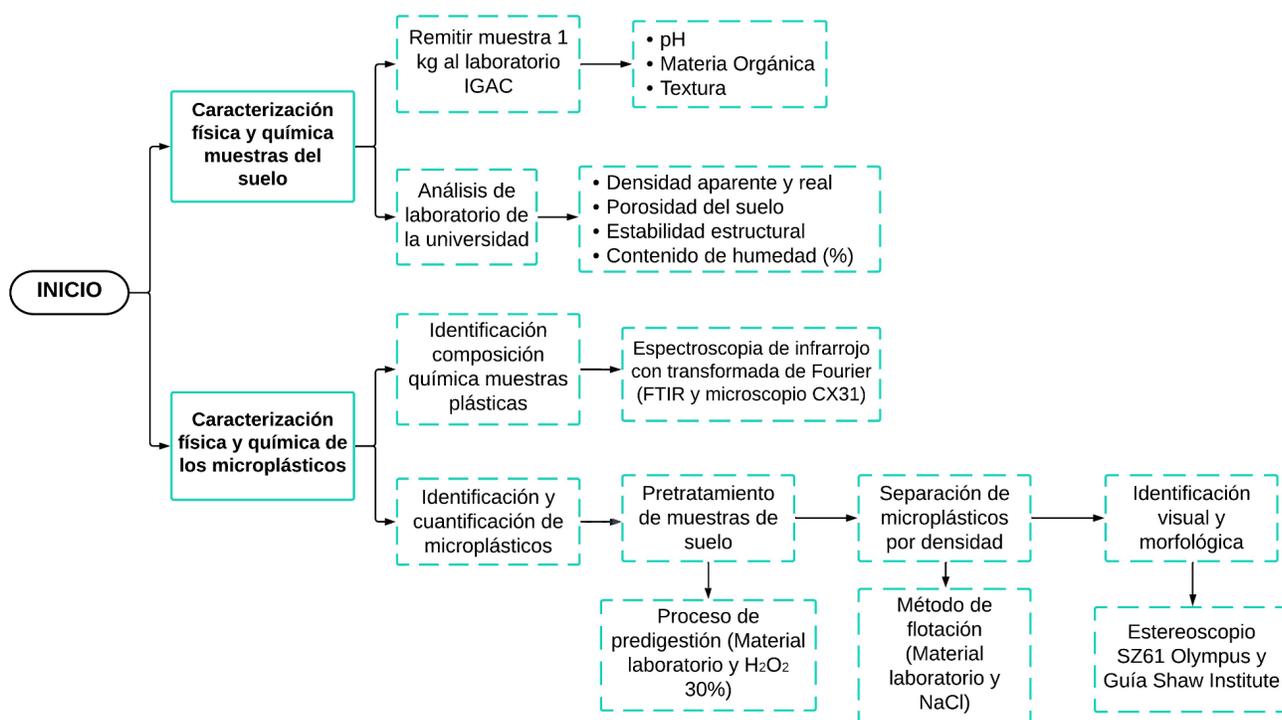


Figura 9. Metodología de objetivo específico 2.

Nota: Elaboración propia adaptado de (Gómez Giraldo, 2013; Blair Crawford y Quinn, 2017; Phan et al., 2022; Huang et al., 2020 y Jia et al., 2022)

8.3.2.1. Caracterización física y química de muestras de suelo

Inicialmente, se identificaron las propiedades físicas y químicas de interés para el estudio a partir de la búsqueda de información secundaria referente a los impactos de los microplásticos en el estado del suelo y cuales propiedades se ven afectadas por la presencia de este contaminante emergente. En este caso, se optó hacer el análisis del pH, materia orgánica, textura, contenido de humedad, estabilidad

estructural, densidad aparente, densidad real y porosidad del suelo, de las cuales se aclara que las tres primeras se determinaron con la muestra de 1 kilogramo recolectada previamente y siendo remitida al laboratorio del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), mientras que las propiedades restantes se evaluaron en los laboratorios de la Universidad El Bosque siguiendo las especificaciones correspondientes para su estimación.

La estabilidad estructural o de agregados del suelo se realizó el análisis por medio del método en húmedo de Yoder, el cual consiste en un conjunto de tamices sometidos a oscilación vertical en el agua. Primeramente, se preparó el equipo neumático del método colocando los tamices de diferentes diámetros en el orden correspondiente (6.30; 4.00; 2.00; 1.00 y 0.25 mm), luego se llenó el balde con agua hasta la línea guía para posteriormente introducir lentamente la torre de tamices. Seguidamente, se colocaron 100 gramos de suelo con agregados secos al aire en el primer tamiz para poner a funcionar el equipo por 30 minutos a 30 oscilaciones por minuto con motor graduado. Una vez terminado el tiempo, se sacó el tándem de tamices dejando drenar el agua por 5 minutos, después se colocó el material retenido en cada uno de los tamices en 5 frascos de vidrio diferentes, los cuales se llevaron a secar a 105°C por 24 h. Con los datos obtenidos, se calculó el porcentaje de los agregados retenidos en cada tamiz ($M_{ssi}\%$) a partir del peso de los agregados en cada uno de estos (M_{SSR}) el diámetro medio ponderado (DMP) con la ecuación 1 y el estado de agregación (EA) en porcentaje con la ecuación 2 para su análisis correspondiente (Gómez Giraldo, 2013).

$$DMP = \sum_{i=1}^n \frac{M_{ssi}\% \times X_i}{100} \quad (1)$$

$$EA = 100 - \sum_{i=1}^n \frac{M_{SSR} \times 100}{M_{SS}} \quad (2)$$

El contenido de humedad gravimétrico ($\% \theta g$) se determinó siguiendo la metodología planteada por Gómez Giraldo (2013), en el cual se establece pesar 25 gramos de muestra de suelo (PHS) para llevarla a secado por 24 horas a una temperatura de 105°C en un recipiente de vidrio pesado previamente. Una vez culminado el tiempo, se pesa el recipiente con la muestra seca dentro de este (PSS) para realizar el cálculo pertinente con la ecuación 3

$$\% \theta g = \frac{PHS - PSS}{PSS} \times 100 \quad (3)$$

La densidad aparente del suelo se analizó por medio del método del terrón parafinado, proceso que consiste en determinar la densidad a través del desplazamiento de un líquido en relación a la masa y volumen de un terrón. Inicialmente, se pesó un agregado del suelo húmedo (PSS), luego se sumergió por unos 30 segundos atado con un hilo a un recipiente con parafina líquida bajo una temperatura de 60°C y se pesó. Una vez retirado, se dejó secar a temperatura ambiente el terrón impregnado de parafina para ser pesado ($PSSP$), posteriormente se metió en una probeta con agua a un volumen medido para tomar el registro del volumen desplazado (V_d) (Gómez Giraldo, 2013). A partir de lo anterior, se calculó la densidad aparente (D_a) con la ecuación 4, teniendo en cuenta que es necesario sacar el dato de densidad de la parafina (D_p) y la masa del suelo seco ($PSS_{105^\circ C}$) se determinó dejando secar a 105°C por 24 horas una parte del terrón sin parafina para sacar su porcentaje de humedad.

$$Da = \frac{PSS\ 105^{\circ}C}{Vd - \left(\frac{PSSP - PSS}{Dp}\right)} \quad (4)$$

La densidad real (Dr) se estimó por medio del método del picnómetro, el cual radica inicialmente en pesar un picnómetro limpio y vacío con tapa (Wa), luego se añadieron 2 gramos de suelo para pesarlo (Ws) y luego, se agregó lentamente agua destilada hasta una cuarta parte de su volumen para llevarlo destapado a una campana de succión por 20 minutos con el fin de retirar todo el aire dentro del suelo. Una vez culminado el tiempo, se llenó todo el espacio restante del picnómetro con agua destilada, luego se tapó y peso (Wsw), posteriormente se vació y lavó por completo para retirar todo tipo de residuo y así, llenarlo nuevamente hasta el tope con agua destilada para pesarlo (Ww)(Gómez Giraldo, 2013). Con estos datos, se determinó la densidad real siguiendo la ecuación 5.

$$Dr = \frac{dw(Ws - Wa)}{(Ws - Wa) - (Wsw - Ww)} \quad (5)$$

Por último, la porosidad del suelo (P) se estimó a partir de los datos obtenidos de densidad aparente (Da) y densidad real (Dr) siguiendo la ecuación 6 (Gómez Giraldo, 2013).

$$P = \left\{1 - \frac{Da}{Dr}\right\} \times 100 \quad (6)$$

8.3.2.2. Caracterización química y física de microplásticos

8.3.2.2.1. Análisis de composición química de muestras plásticas

Durante la visita técnica, se recolectaron muestras de los productos plásticos utilizados en la actividad agrícola de la finca para someterlos a un análisis diagnóstico de su composición química y morfológica. Para ello, se cortaron fragmentos de un tamaño aproximado de 2 a 3 cm de las diferentes muestras, posteriormente se hizo la identificación química de cada una por medio del uso de la técnica de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) a través de un espectrómetro aplicando un rango de 400 a 4000 cm^{-1} bajo una resolución de 4 cm^{-1} (Figura 10), la cual gracias a su principio de funcionamiento permite obtener información específica sobre los enlaces de átomos que componen al material, en este caso, los enlaces poliméricos para hacer un reconocimiento del tipo de plástico de las muestras (Phan et al., 2022). Por otra parte, los fragmentos se llevaron a un análisis morfológico a partir de la identificación visual con ayuda de un microscopio óptico Olympus CX31 bajo un objetivo óptico 10X, con el fin de observar las diferentes formas que se llegan a presentar en una muestra plástica (Blair Crawford y Quinn, 2017).



Figura 10. Espectrómetro Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR).

Nota: (Investiga CDT, 2023)

8.3.2.2.2. Caracterización física de microplásticos

Para la caracterización de MP, se consideró el orden planteado por Yang et al. (2022) sobre los métodos analíticos de microplásticos en el suelo, el cual incluye pretratamiento de muestras, separación e identificación y cuantificación.

8.3.2.2.2.1. Pretratamiento de muestra de suelo

Para el procesamiento de la muestra de suelo, según Thomas et al. (2020) se recomienda homogeneizar de forma manual haciendo uso de tamices 1, 2 y 5 mm, para este caso se empleó el tamiz con diámetro de 2 mm para eliminar las impurezas del suelo como raíces y piedras hasta obtener un suelo fino. Posteriormente, se realizó el secado de la muestra considerando lo establecido en Lee, et al. (2023), donde se sugiere mantener un rango de temperatura de 25 a 105°C por un tiempo de 24 a 48 horas para evitar la deformación de microplásticos, por ello para este estudio se optó secarla a 40°C por 48 h.

Además, según Lee, et al. (2023) resulta fundamental determinar la cantidad de suelo a emplear para el análisis de MP, puesto que puede llegar a obtenerse cantidades más altas o bajas de microplásticos presentes en el suelo, empero la cantidad suele variar significativamente entre 1 a 1000 g en los estudios realizados. Entonces, para este caso, se opta por hacer dos pretratamientos con diferentes cantidades de muestra, el primer pretratamiento con 30 g y el segundo con 15 g con el fin de evidenciar si existe alguna relación entre cantidad de suelo y presencia de MPI al momento de la cuantificación.

Por otra parte, para hacer una correcta caracterización resultó necesario hacer un proceso de predigestión donde se eliminó la materia orgánica (MO) del suelo, puesto que sus componentes pueden llegar a interferir con el futuro análisis de microplásticos (Thomas et al., 2020). Para ello, se eligió como agente de digestión el peróxido de hidrógeno al 30% (v/v), puesto que se ha comprobado su eficiencia en la eliminación de MO de la matriz suelo (Duan et al., 2020).

En este orden de ideas, para los pretratamientos, se pesaron 30 g y 15 g de la muestra de suelo seco, los cuales se dispusieron en un erlenmeyer de 250 mL cada uno, luego sucesivamente se añadió 150

mL de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 30% durante 72 h a 50°C programado en un agitador de laboratorio para eliminar cualquier rastro de materia orgánica en la muestra (Huang et al., 2020).

8.3.2.2.2. Separación de muestras por densidad

Una vez culminado el tiempo, se dejó reposar a temperatura ambiente hasta la sedimentación completa del suelo, posteriormente se recogió 100 mL de sobrenadante de cada muestra en un vaso precipitado para ser filtrados en un sistema de bomba al vacío con ayuda de un embudo plástico y filtro de microfibras de vidrio (1,2 μm) (Huang et al., 2020; Jia et al., 2022).

Luego, al líquido resultante de la filtración se le aplicó la técnica de separación por densidad a partir de soluciones saturadas, para este caso, se prepararon dos soluciones saturadas de cloruro de sodio (NaCl) ($\rho = 1,2 \text{ g/cm}^3$) a partir de 50 g de sal de cocina (NaCl) disuelto en 200 mL de agua destilada con ayuda de un agitador magnético a 30°C por 30 minutos a 120 rpm. Estas se agregaron en cada erlenmeyer respectivamente dejándolos reposar por 24 h, al cabo del tiempo establecido, se filtró nuevamente las mezclas en un sistema de bomba al vacío con filtro de microfibras de vidrio (1,2 μm) (Jia et al., 2022).

8.3.2.2.2.3. Identificación y cuantificación de microplásticos

Para la identificación y cuantificación de los microplásticos, se empleó la técnica más fácil siendo la identificación visual con la ayuda de un microscopio estereoscópico (Olympus SZ61) (Huang et al., 2020) y la guía de Shaw Institute (2019), debido a que no es posible tener acceso a instrumentos analíticos costosos. No obstante, según Blair Crawford y Quinn (2017) resulta necesario seguir algunos criterios para armonizar mejor el método de observación para detectar microplásticos de tamaño 0,5 a 5 mm, de las cuales se tomó en cuenta las siguientes: No pueden presentar estructuras orgánicas o celulares y las fibras plásticas deben tener el mismo diámetro a lo largo de su longitud.

En este sentido, los filtros obtenidos del sobrenadante y de la separación por densidad se analizaron y observaron en el estereoscópico aplicando la lectura de la derecha a la izquierda (Figura 11), donde a medida que se iba avanzando se registraba el conteo de microplásticos acorde a lo establecido por Shaw Institute (2019) (Tabla 2), sumado a esto se tomó registro fotográfico de cada reconocimiento visual.

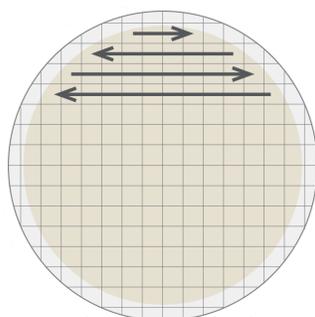


Figura 11. Procedimiento de lectura del filtro.

Nota: (Shaw Institute, 2019)

Tabla 3.
Ficha de conteo de microplásticos

	Color							Total por filtro
	Azul	Rojo	Transparente /Blanco	Negro	Verde	Multi color	Otro color	
Filamento								
Redondo								
Forma Angular								
Otra forma								
Total								

Nota: (Shaw Institute, 2019)

8.3.3. Objetivo Específico 3

Por último, para el tercer objetivo se planteó diseñar experimentalmente una metodológica para la extracción de microplásticos partiendo de una revisión exhaustiva de literatura sumado de un análisis de decisión multicriterio con matrices de decisión con el fin de hacer el planteamiento de las etapas de extracción química y física de los microplásticos y la construcción de la estrella verde como criterios de sostenibilidad, para ello se proponen las siguientes actividades:

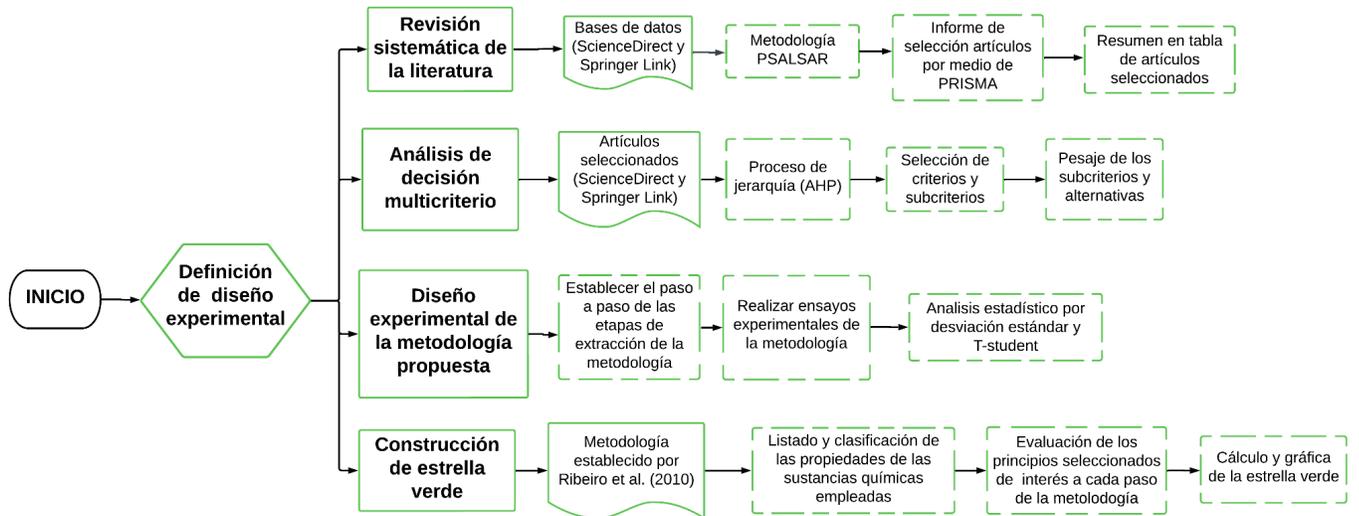


Figura 12. Metodología de objetivo específico 3.

Nota: Elaboración propia adaptado de (Tikito y Souissi, 2019; Mengist et al., 2020; Berumen y Llamazares Redondo, 2007; Thomas, 2014; Scopetani et al., 2020; Prosenc et al., 2021; Kononov et al., 2022; Yuan et al., 2022 y Ribeiro et al., 2010)

8.3.3.1. Revisión sistemática de la literatura

Para dar inicio con el diseño de la metodología de extracción de microplásticos en suelos, se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva a partir de la revisión sistemática de la literatura de la última década comprendiendo la recopilación y análisis crítico de los múltiples estudios realizados por medio de la implementación y adaptación del método PSALSAR (Tabla 3), el cual comprende 6 pasos básicos para evaluar el conocimiento, tendencias y brechas de las investigaciones referente al tema (Mengist et al., 2020).

Tabla 4.
Marco PSALSAR para estudios sistemáticos

Pasos	Resultados	Métodos
Protocolo	Alcance del estudio definido	Metodologías de extracción de microplásticos en suelos
Buscar	Definir la estrategia de búsqueda	Buscando cadenas
	Buscar estudios	Buscar bases de datos
	Seleccionar estudios	Definición de criterios de inclusión y exclusión
Evaluación	Evaluación de la calidad de los estudios.	Criterios de calidad
	Extraer datos	Plantilla de extracción
Síntesis	Categorizar los datos	Clasifique los datos en la definición iterativa y prepáralos para trabajos de análisis posteriores.
	Análisis de los datos	Categorías cuantitativas, descripción y análisis narrativo de los datos organizados.
Análisis	Resultado y discusión	Con base en el análisis, muestre las tendencias, identifique brechas y compare resultados.
	Conclusión	Deducir conclusiones y recomendaciones
Informe	Reporte escrito	Adaptación Metodología PRISMA

Nota: (Mengist et al., 2020)

En este sentido, se partió con el protocolo definiendo el alcance del objetivo del diseño experimental, el cual resulta ser estudios asociados a metodologías de extracción de microplásticos en la matriz suelo, donde se indague sobre las técnicas existentes y estudiadas al igual que sus diferencias entre sí para conocer sus ventajas y desventajas (Mengist et al., 2020; Kozłowska, 2022). Luego, se realizó la búsqueda de información secundaria en las bases de datos ScienceDirect y Springer Link a partir del uso de la sintaxis (TITLE-ABSTRACT-KEYWORD) como función de búsqueda con combinaciones diversas, como “extraction” AND “microplastic” AND “soil”, “density separation” AND “microplastic” AND “soil”, “hydrophobic separation” AND “microplastic” AND “soils”, sumado se definió un rango de años siendo 2018-2023 para obtener información actualizada (Mengist et al., 2020).

Por otra parte, se seleccionaron los criterios de inclusión como separación por densidad con base en aceite, especificación de su proceso en cuanto a datos, tipo de polímero (polietileno) junto con lo criterios de exclusión como métodos costosos, separación de densidad únicamente con soluciones saturadas, no considerar la hidrofobicidad del MPI y se de artículos para el interés del estudio para hacer el rastreo y distinción de aquellos artículos científicos útiles para la ejecución del objetivo específico 3, cuya elección se presentó bajo la metodología de PRISMA (Tikito y Souissi, 2019; Mengist et al., 2020).

8.3.3.2. Análisis de decisión multicriterio

En este apartado, se fusionó los pasos 3, 4 y 5 del método PSALSAR (Tabla 3) con la técnica de análisis de multicriterio (ACM, por sus siglas en inglés), la cual facilita la toma de decisiones de las alternativas de los criterios de interés existentes en las diversas metodologías de extracción de microplásticos enfocados a separación de densidad por aceite (Kozłowska, 2022). La herramienta más comúnmente utilizada de ACM es el proceso de jerarquía analítica (AHP, por sus siglas en inglés), debido a que permite colocar las variables de decisión que se deseen comparar en forma de jerarquías y relación con las diferentes alternativas (Ramik, 2020; Berumen y Llamazares Redondo, 2007).

En este orden de ideas, se extrajeron los parámetros equiparables de los artículos de investigación seleccionados en el apartado anterior con los datos puntuales de estos analizando sus diferencias, decisiones por dichos valores y brechas existentes entre estos. Una vez esto, se llevó a cabo la construcción de jerarquía AHP a partir del propósito de interés, los criterios y/o subcriterios escogidos y las alternativas que resultan siendo las diversas metodologías evaluadas (Berumen y Llamazares Redondo, 2007). Posteriormente, se reunió dicha información en una matriz de decisión, donde se hace la respectiva comparación y evaluación de cada uno de los criterios con respecto a las alternativas de metodologías de extracción.

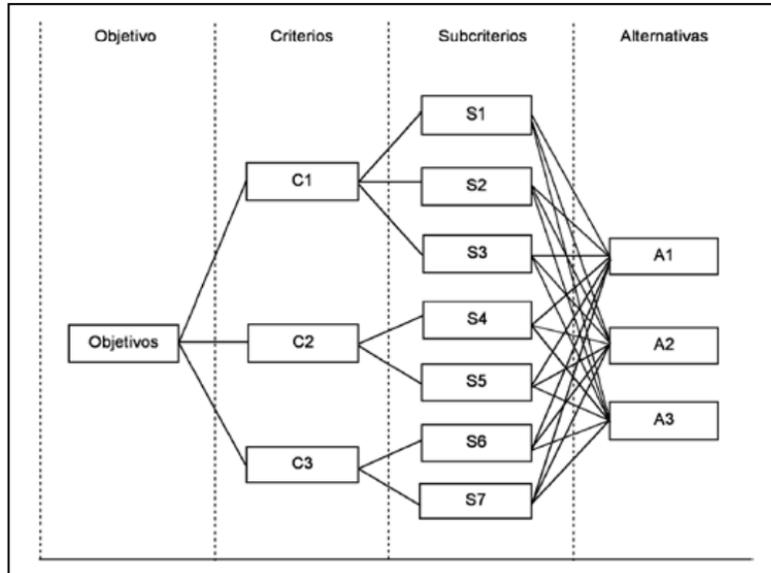


Figura 13. Jerarquía AHP.

Nota: (Berumen y Llamazares Redondo, 2007)

Con el fin de darle priorización a los criterios para su selección acorde a cada metodología, se empleó el software TotalDecision, mediante el cual será posible darle valor a cada criterio con la alternativa para escoger aquel criterio que mayor compete con dicha alternativa, gracias a la escala de Saaty (Berumen y Llamazares Redondo, 2007).

Escala numérica	Escala verbal
1	Ambos criterios o elementos son de igual importancia
3	Débil o moderada importancia de uno sobre el otro
5	Importancia esencial o fuerte de un criterio sobre el otro
7	Importancia demostrada de un criterio sobre otro
9	Importancia absoluta de un criterio sobre otro
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes, que se emplean cuando es necesario un término medio entre dos de las intensidades anteriores
2	Entre igualmente y moderadamente preferible
4	Entre moderadamente y fuertemente preferible
6	Entre fuertemente y extremadamente preferible
8	Entre muy fuertemente y extremadamente preferible

Figura 14. Escala de Saaty

Nota: (Berumen y Llamazares Redondo, 2007)

8.3.3.3. Análisis estadístico

Una vez definida la metodología de extracción propuesta considerando las características del suelo de la finca bananera y del tipo de microplástico, se realizaron los ensayos experimentales para evaluar su eficiencia de recuperación por el método de conteo visual y cuantificación de pérdida de masa de los microplásticos de ensayo, sin embargo, para un mejor análisis estadístico de los resultados obtenidos se considera la implementación de métricas estadísticas como la desviación

estándar, como medida de dispersión y descarte de valores junto con la prueba T-student, como cálculo de incertidumbre de los valores.

En este sentido, la desviación estándar (σ) como medida de dispersión y grado de variabilidad se calculó para cada conjunto de datos de ambos métodos a considerar en la metodología a partir de la ecuación 7, donde se considera la suma de cada valor obtenido (x_i) y el promedio de esto (\bar{x}) sobre el número total de datos (n)(Thomas, 2014). Sin embargo, para mayor facilidad, se empleó la fórmula de “DESVEST” en Excel.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (7)$$

Por otro lado, se considera la prueba T-student como prueba estadística para calcular la incertidumbre de los valores obtenidos por cada método de eficiencia de recuperación, cuyo cálculo se realizó considerando la desviación estándar previamente calculada junto con el valor t tal como se expresa en la ecuación 8.

$$S_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \times t \quad (8)$$

El valor t se obtuvo con el grado de libertades, donde los grados hacen referencia al número de datos de la serie estadística menos uno ($N-1$), una vez determinado en la tabla establecido por Bencardino, C. M. (2019). Se busca el valor de t que corresponda al grado de libertad con un nivel de confianza de 95 %, es decir, equiparando con los valores obtenidos para 5% (0,05) de la tabla.

8.3.3.4. Construcción de estrella verde

Para evaluar la sostenibilidad de la metodología propuesta de extracción, se planteó el uso de la herramienta de la estrella verde basada en los principios de la química verde, cuya construcción se realizó bajo la metodología planteada por Ribeiro et al. (2010).

En este sentido, se inició listando las sustancias químicas empleadas durante la metodología de extracción para asignarle una calificación en una escala de 1 a 3 referente al riesgo que representa para la salud humana, ambiente, potencial accidente químico (Tabla 5) junto con su capacidad de degradabilidad y renovabilidad (Tabla 6) acorde a las fichas de seguridad de cada una de estas.

Tabla 5.

Clasificación de riesgos para la salud humana, ambiente y potencial accidente químico

Riesgo	Símbolos de peligro	Puntuación
	C (Corrosivo)	
Salud	T (tóxico)	3

	T+ (Muy tóxico)	
	Xi (Irritante)	2
	Xn (Dañino)	
	No hay indicación	1
Ambiente	N (Peligroso para el medio ambiente)	3
	No hay indicación	1
	F (Altamente inflamable)	3
Inflamabilidad	F+ (Extremadamente inflamable)	
	No hay indicación	1
	Mi (Explosivo)	3
Reactividad	O (Agente oxidante)	2
	No hay indicación	1

Nota: (Ribeiro et al., 2010)

Tabla 6.
Capacidad de degradabilidad y renovabilidad

Característica	Descripción	Puntuación
	No es degradable y no puede tratarse para convertir las sustancias degradables en productos inocuos.	3
Degradabilidad	No es degradable, pero puede tratarse para convertir las sustancias degradables en productos inocuos.	2
	Degradable y rompible a productos inocuos.	1
Renovabilidad	No renovable	3
	Renovable	1

Nota: (Ribeiro et al., 2010)

Luego, se determinó de los 12 principios de la química verde (Tabla 1) aquellos aplicables a evaluar en la metodología de extracción propuesta como criterios de sostenibilidad para ponderar los pasos del procedimiento en cuanto a su verdor, característica que se atribuye al considerar las métricas

sostenibles, índices de seguridad inherentes y factores de impacto ambiental del proceso (Doble et al., 2007). Para ello, se le asignó un valor en una escala de 1 a 3 a cada principio que aplique a la etapa establecida de la metodología, una vez estimado el valor se promedia la puntuación de los principios sobre la cantidad de etapas evaluadas para dicho principio en cuestión.

Posteriormente, se construyó la estrella verde del procedimiento propuesto y se calculó el área seccional (As) de cada rango de principios con la ecuación 9, donde el ángulo (α) se estimó dividiendo los 360° en la cantidad de principios evaluados.

$$As = (P_i P_{i+1} - 1)(sen\alpha)/2 \quad (9)$$

A partir de estos valores, se logró estimar el área de la estrella ($GS \text{ Área}$) sumando las áreas para la cantidad de ramas de la estrella, donde i hace referencia a los ejes, más no a los principios como la ecuación 10, además, fue posible determinar el área total de esta con el número de principios escogidos (n) y la puntuación máxima de $p_i=3$ por medio de la ecuación 11.

$$GS \text{ Área} = [\sum_{i=1}^n (P_i P_{i+1} - 1)](sen\alpha)/2 \quad (10)$$

$$Full \text{ Área} = [n (3 \times 3 - 1)](sen\alpha)/2 \quad (11)$$

Por último, se sacó el índice de área de la estrella verde ($GSAI$) con los valores anteriores y la ecuación 12 con el fin de evaluar semicuantitativamente la sostenibilidad de la metodología propuesta.

$$GSAI(\%) = 100(GS \text{ área}/Full \text{ área}) \quad (12)$$

9. Resultados y análisis de resultados

9.1. Objetivo específico 1

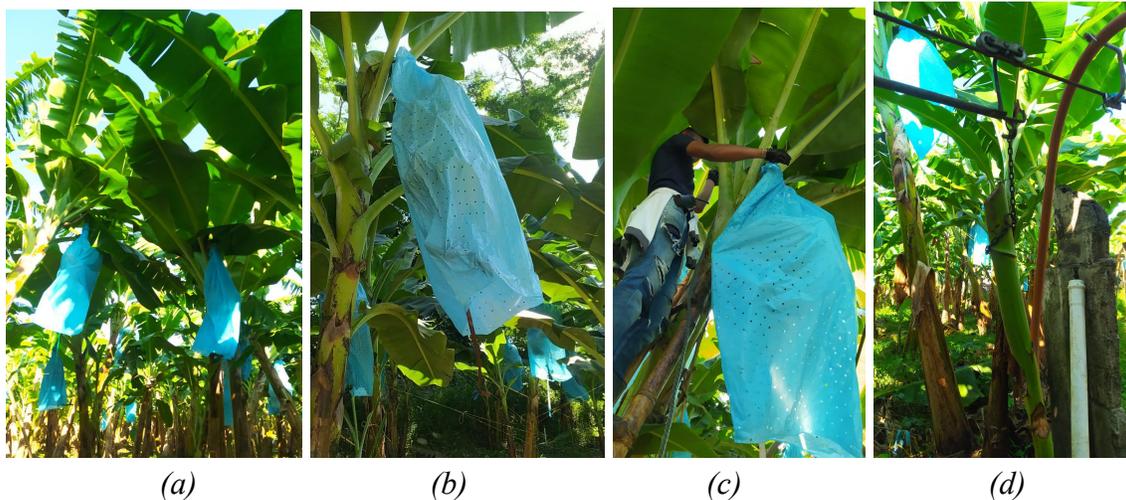
9.1.1. Visita Técnica Finca Bananera

Inicialmente, se llevó a cabo la visita técnica a la finca “Vega Caballero” ubicada en el municipio de la Zona Bananera, donde se realizaron las entrevistas pertinentes a Jonathan Araujo, trabajador de la finca y Juan Pablo Granados, gerente de la finca, quienes dieron el recorrido por la finca y proporcionaron información sobre el proceso del cultivo de banano, permitiendo así entender las condiciones que propician la acumulación de PEBD y las problemáticas ligadas a esta.

De acuerdo con los entrevistados, el cultivo de banano se realiza en las 24 hectáreas totales de la finca (Figura 8) y se cosechan 1954 racimos al mes, dando un total de producción de 2247 cajas/mes, donde cada una pesa 20 kg. En otras palabras, la finca produce aproximadamente un total de 44,94 toneladas de banano al mes destinadas a la exportación a Estados Unidos (J.P, Granados, comunicación personal, 08 de junio de 2023).

Además, comentan que la producción agrícola empieza en la semana 1 con la siembra de la planta, luego de 22 a 24 semanas se puede observar el crecimiento de las dos primeras manos¹ de los racimos, momento en el que se embolsa (Figura 15a) y al mismo tiempo, se identifica la etapa de estos en el ciclo productivo por medio del uso de tiras plásticas de diferentes colores (Figura 15b), los cuales representan la semana del inicio de fase del racimo permitiendo contar 11 semanas después para la cosecha (J.P, Granados, comunicación personal, 08 de junio de 2023).

Una vez los racimos de banano alcancen su punto de maduración y cumplan con los criterios de calidad, se retira la bolsa plástica y la tira identificadora para proceder a cortar el tallo con un machete (Figura 15c), luego serán transportados por medio del sistema de garruchas a través de toda la finca (Figura 15d) hasta llegar a la planta empacadora, donde se seleccionan, lavan y etiquetan aquellas manos del racimo que acatan con los requisitos para exportación (J, Araujo, comunicación personal, 08 de junio de 2023).



¹ Este término hace referencia al grupo de bananas unidas por un mismo punto de enganche en el tallo del racimo (J.P, Granados, comunicación personal, 08 de junio de 2023).

Figura 15. (a) Plantación de banano embolsado. (b) Racimo embolsado e identificado. (c) Proceso de corte de racimo. (d) Garrucha de transporte de racimo. Elaboración propia

Acorde a las entrevistas realizadas, el proceso del cultivo de banano dura en un total de 35 semanas, de las cuales 11 semanas el racimo permanece dentro de la bolsa plástica azul de polietileno de baja densidad (PEBD), cuyo uso permite crear un microclima que favorece el crecimiento en peso de los bananos en condiciones particulares de temperatura, humedad y luminosidad (Grajeda, 2001, como se citó en Arango Vargas, 2015). Así como, al tratarse de una finca convencional, las bolsas contienen agroquímicos propiciando un tipo de barrera protectora ante plagas de insectos y murciélagos (J, Araujo, comunicación personal, 08 de junio de 2023), sin embargo para el proyecto en cuestión esta variable no se considera en el proceso de la identificación y extracción de MPI.

Según el gerente de la finca, afirma que al momento de la cosecha las bolsas plásticas que terminan como residuos se acopian una vez a la semana para entregarlas a la empresa encargada del reciclaje (Figura 16b), mientras que las tiras plásticas identificadoras se recogen para ser utilizadas nuevamente (Figura 16a). Respecto a esto, comenta que en la finca se utilizan 1300 bolsas semanalmente, las cuales pueden llegar a terminar a ser desechadas o pueden llegar a ser reutilizables si cumplen con las condiciones necesarias para el cultivo (J, Araujo y J.P, Granados, comunicación personal, 08 de junio de 2023).



Figura 16. (a) Evidencia fotográfica de las tiras plásticas. (b) Evidencia fotográfica de los residuos de bolsas plásticas de PEBD. Elaboración propia

Por otro lado, Granados (gerente de la finca) manifiesta que en la finca se ha evidenciado una problemática asociada a los plásticos, puntualmente a las pitas empleadas para amarrar las plantas de banano evitando el choque entre estas, aproximadamente se utilizan entre 10 a 12 metros de pita para sujetar 1600 a 1700 matas en una hectárea, donde casi el 50% de estas se quedan en el suelo, lo cual se confirmó al momento del muestreo del suelo (Figura 18b) (J.P, Granados, comunicación personal, 08 de junio de 2023).

En este orden de ideas, gracias a las entrevistas realizadas, fue posible comprender el uso y manejo de los diferentes productos plásticos necesarios para la actividad agrícola dentro del proceso del

cultivo de banano (Figura 17). De esta forma, es viable reconocer los puntos críticos del proceso para intervenir e implementar prácticas efectivas de manejo de residuos con el fin de evitar la contaminación causada por plásticos.

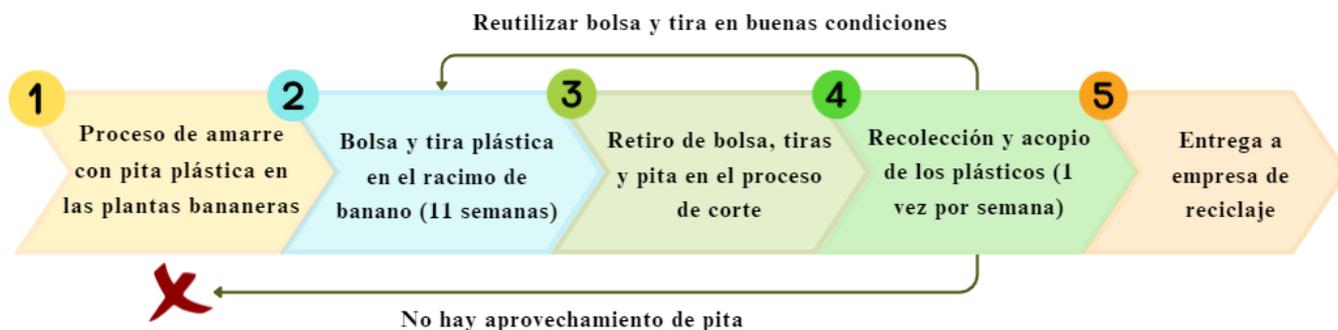


Figura 17. Uso y manejo de los diferentes plásticos dentro del proceso del cultivo bananero. Elaboración propia

De acuerdo con una entrevista realizada a Edgardo Alvarado de Asobanacoorp, una cooperativa de pequeños productores de río Frío por Uribe (2020), las fincas de gran extensión se les dificulta llevar un control estricto sobre las bolsas plásticas durante el proceso de la cosecha, por lo cual, pueden llegar a estar generando mayores residuos y por ende, contaminando el suelo del cultivo y la ronda del río. Esto se confirma con la visita realizada, puesto que durante el recorrido se logró observar fragmentos de las bolsas plásticas, tiras plásticas y pita enredadas en la vegetación y enterradas en el suelo (Figura 18), por ello se puede aseverar que las jornadas de limpieza no son eficientes en cuanto al manejo de los diversos plásticos empleados en el sistema del cultivo.

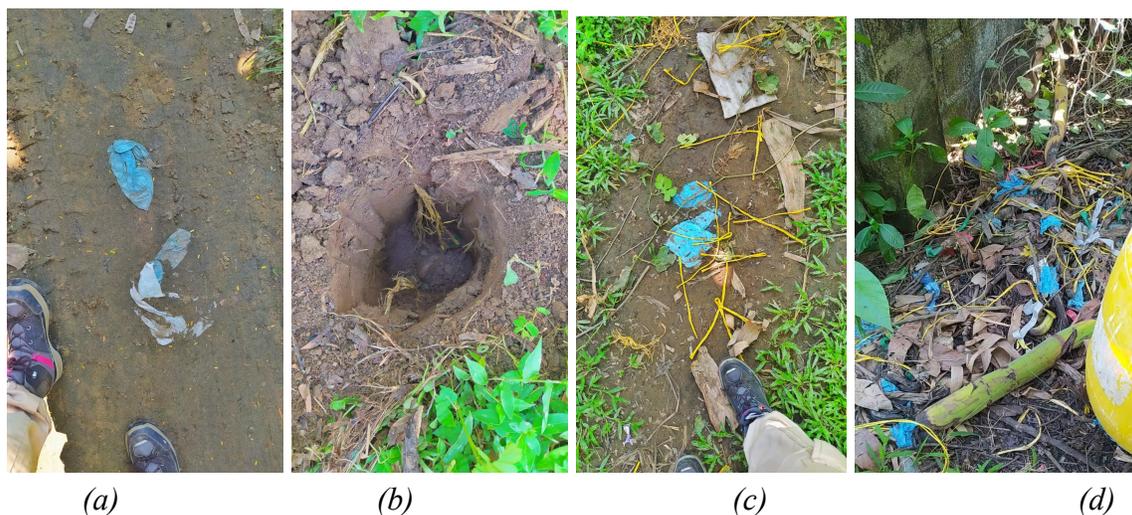


Figura 18. (a) (c) Evidencia fotográfica de la presencia de fragmentos de bolsas plásticas y pitas en el suelo (b) Evidencia fotográfica de pitas enterradas en el suelo (d) Evidencia fotográfica de recolección inadecuada de tiras de los productos plásticos empleados. Elaboración propia

9.2. Resultados objetivo específico 2

9.2.1. Caracterización física y química del suelo

Acorde a la metodología planteada, se realizó la toma de muestras en los puntos establecidos (Figura 8) obteniendo un total de 1,25 kg de muestra enviada al laboratorio del IGAC para el correcto análisis de las propiedades químicas y físicas en cuestión, al mismo tiempo se obtuvo una muestra de 4,27 kilogramos para la determinación de las otras propiedades físicas en las instalaciones de la universidad, así como su uso para el diseño y experimentación de la metodología de extracción propuesta en el presente proyecto.

Los resultados obtenidos de los parámetros de interés se recopilaron (Tabla 7) para su correspondiente análisis del estado del suelo.

Tabla 7.

Propiedades fisicoquímicas de la muestra de suelo

Propiedades físicas		Valor	Propiedades químicas	
				Valor
Textura	Arena (%)	66,7	pH	6,5
	Limo (%)	25	Carbono Orgánico (%)	0,24
	Arcilla (%)	8,3	Materia Orgánica (%)	0,41
Estabilidad de agregados	Diámetro ponderado medio (DPM)	0,29		
	Estado de agregación (E.A - %)	1,36		
Contenido de Humedad (%)		12,26		
Densidad Aparente (g/cm ³)		1,05		
Densidad Real (g/cm ³)		2,91		
Porosidad Total (%)		64,05		

Nota: Tomado de los resultados obtenidos del IGAC y de propia autoría.

9.2.2. Caracterización física y química de los microplásticos

9.2.2.1. Identificación de la composición química de las muestras plásticas

De acuerdo con la metodología planteada, se recolectaron muestras de la bolsa, tira y pita plástica utilizadas durante el proceso de la finca para realizar el análisis cualitativo por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) con el fin de determinar la composición química del material por medio del espectro de frecuencias resultante de la espectroscopia IR. De esta forma, poder identificar el tipo de polímero de los microplásticos presentes en la finca bananera resultado de la degradación de las muestras plásticas en la zona.

Para determinar la huella dactilar del material, se manejó un rango de longitud de onda de 400 a 4000 cm^{-1} correspondiente a la región de infrarrojo medio del espectro, el cual permite obtener la información cualitativa sobre los grupos funcionales y la estructura molecular del material de interés (Peña, 2023). En este sentido, los espectros obtenidos de la bolsa plástica azul, tira plástica marrón y pita plástica amarilla se muestran en las figuras 19, 20 y 21 respectivamente.

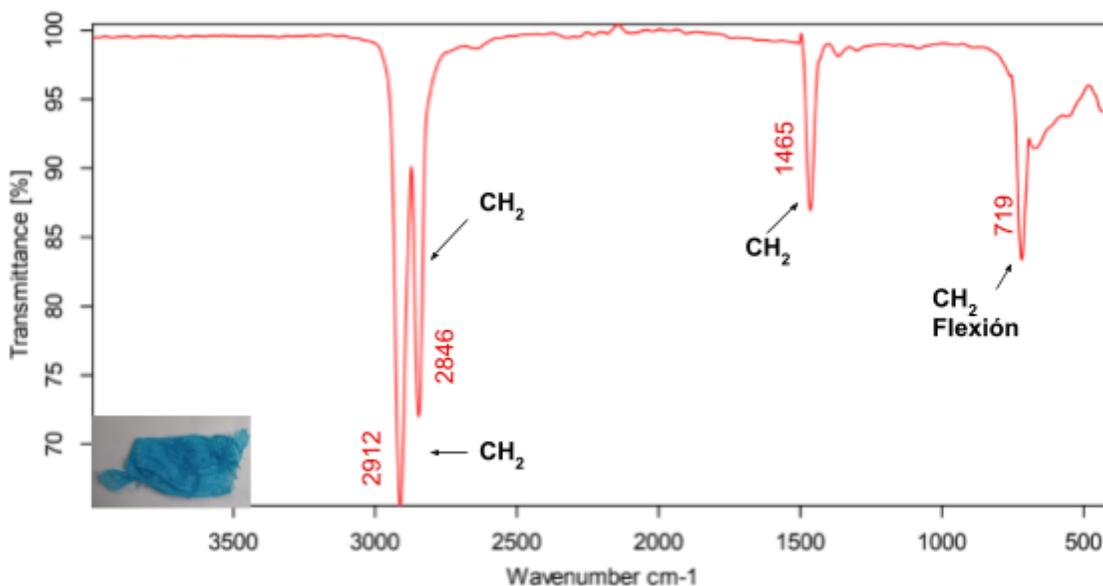


Figura 19. Espectro infrarrojo de la bolsa plástica azul. Elaboración propia

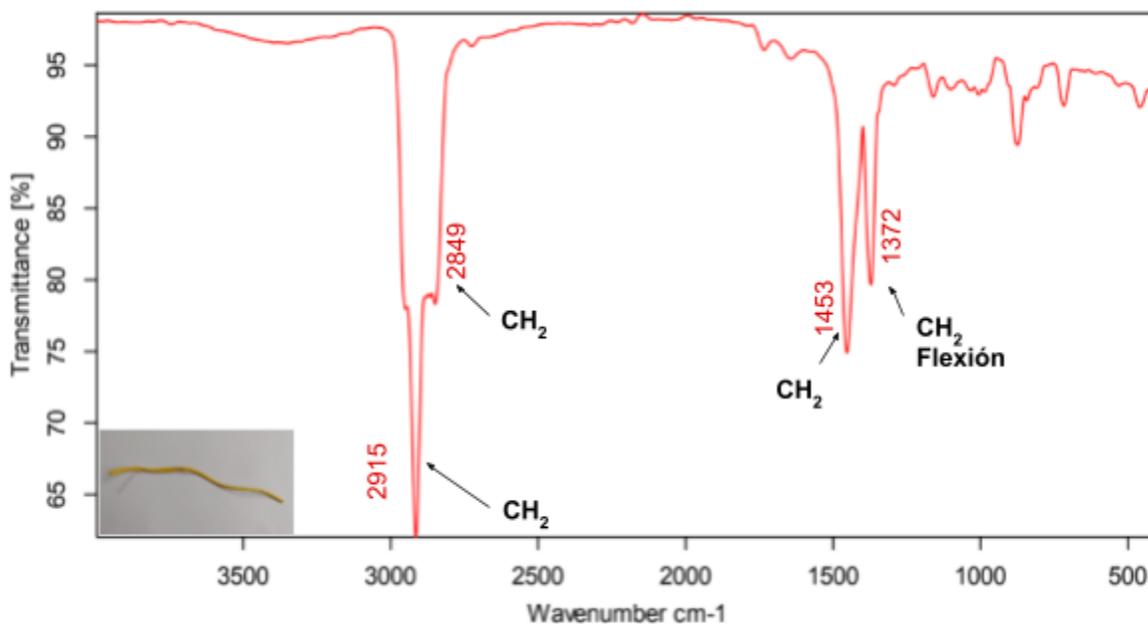


Figura 20. Espectro infrarrojo de la pita plástica amarilla. Elaboración propia

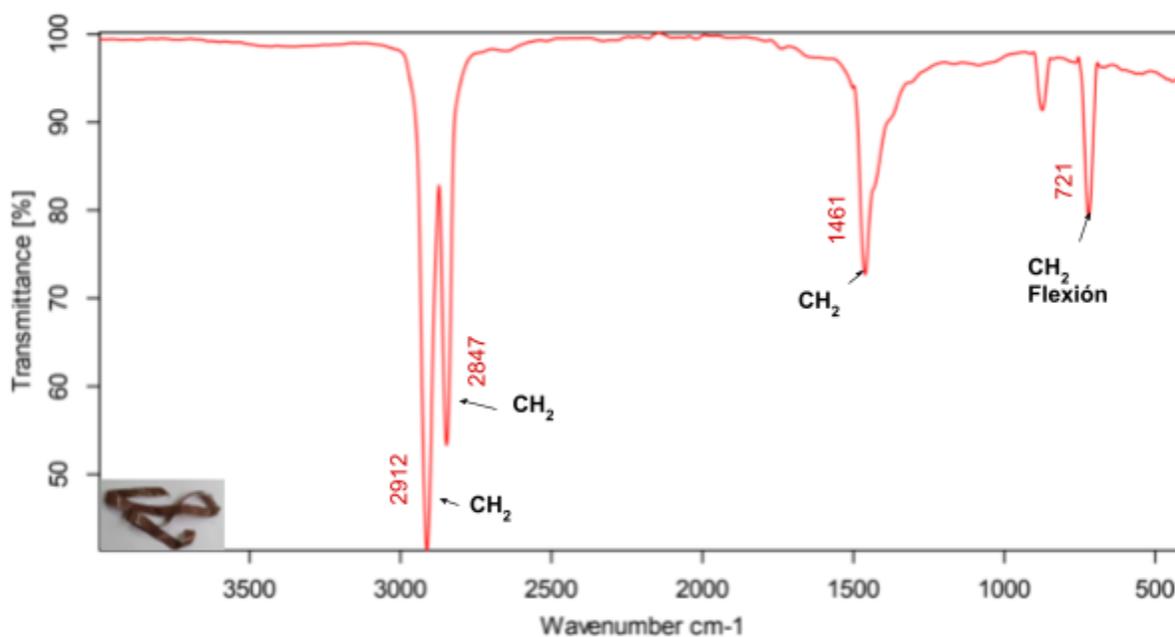


Figura 21. Espectro infrarrojo de la tira plástica marrón. Elaboración propia

La interpretación de estos espectros infrarrojos se hizo equiparando la información de las longitudes de onda obtenidas en los picos de absorción con lo establecido en la literatura, donde se identificó que la mayoría de absorciones se sitúan en la región entre $1400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$, permitiendo así identificar los enlaces químicos que componen al material.

En este sentido, se logró observar que las tres muestras plásticas presentan picos de absorción en un intervalo de longitudes entre $2846\text{-}2915\text{ cm}^{-1}$, los cuales corresponden a los enlaces de hidrocarburo

alifático (C-H) que presenta grupos metileno (CH_2), puesto que este tipo de enlaces se encuentran en el espectro en un rango de $2859 - 3000 \text{ cm}^{-1}$ (Peña, 2023). También, se identificaron longitudes de onda en un rango de $1453 - 1465 \text{ cm}^{-1}$, las cuales coinciden con el estiramiento simétrico del grupo metileno del enlace C-H, además del enlace carbono simple (C-C), debido a que estos se ubican en el espectro en un intervalo de $1475-1625 \text{ cm}^{-1}$ (Peña, 2023).

Por otra parte, en cuanto a las absorciones encontradas en el rango de $719 - 1372 \text{ cm}^{-1}$, se establece que hay presencia de enlaces de hidrocarburo alifático (C-H) con grupo metileno con vibraciones de flexión, dado que este tipo de vibración para este enlace se sitúan entre los $500-1380 \text{ cm}^{-1}$ (Peña, 2023). Este tipo de movimiento del enlace hace referencia a que no se presenta de forma de alargamiento (tensión) como los enlaces anteriormente identificados, sino que existe una rotación angular del enlace (Peña, 2023). No obstante, esta identificación se descarta para la determinación del tipo de polímero, puesto que se ubican en la región bajo los 1400 cm^{-1} , donde no se puede hacer correlaciones seguras de la composición química del objeto (Peña, 2023).

9.2.2.2. Identificación y cuantificación de microplásticos

Continuamente, se procedió hacer dos evaluaciones para la caracterización y estimación de microplásticos tal como se estableció en la metodología planteada. A cada una se le realizó el pretratamiento de materia orgánica, evitando así cualquier tipo de interferencia en el momento de la separación por densidad e identificación y cuantificación visual de los microplásticos en el suelo.

Inicialmente, durante la identificación visual de los microplásticos, se equiparó las observaciones del estereoscopio obtenidas con las imágenes referenciales dadas en la guía Shaw Institute (2019) para la correcta caracterización de estos fragmentos plásticos, donde se evidenciaron en ambas muestras de 15 g y 30 g la presencia mayormente en forma de filamentos en color rojo, azul y transparente (Figura 22).

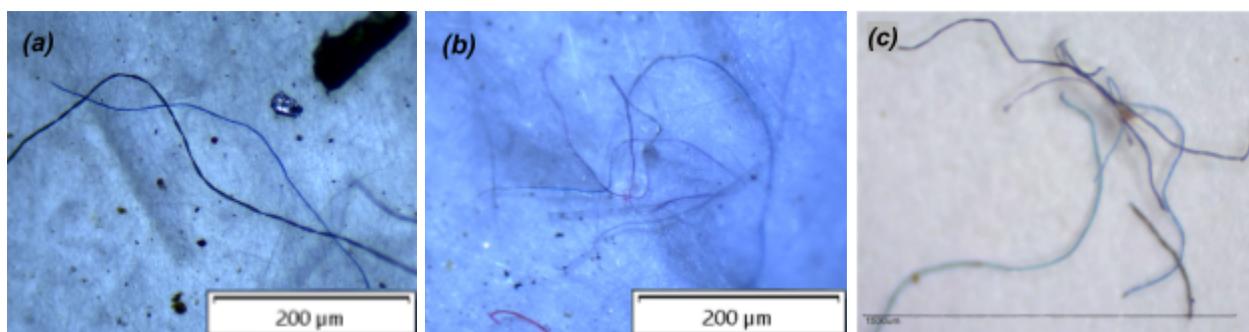


Figura 22. (a) Micrografías de estereoscopio a 4,5x evidenciados en la muestra de 30 g (b) Micrografías de estereoscopio a 4,5x evidenciados en la muestra de 15 g. Elaboración propia. (c) Micrografías de filamentos multicolores de Shaw Institute (2019)

Por otra parte, se observaron bajo microscopio cada una de las muestras plásticas recolectadas durante la visita con el fin de caracterizar su composición morfológica como referencia para comparar las imágenes obtenidas de cada una de las muestras de suelo. Las figuras 23 muestran las partículas plásticas encontradas en la muestra de 15 g, donde se observa un filamento rojo (a),

filamentos azules (b) y un fragmento transparente (c), los cuales se compararon con los filamentos obtenidos de la observación de la bolsa plástica azul, tira plástica marrón y pita plástica amarilla. De igual forma, se hizo con las imágenes de las muestras obtenidas para la muestra de 30 g en la figura 24, comprobando que los filamentos pueden variar en su color y derivar de cualquiera de la degradación de los tres productos plásticos empleados en la actividad.

Además, por lo establecido en la guía Shaw Institute (2019), se obtuvo la cuantificación de microplásticos en cada muestra, donde para la muestra de 15 g se evidenciaron 102 partículas MPI por 100 mL de sobrenadante, mientras que para la muestra de 30 g se contaron 123 partículas MPI por 100 mL. Estos valores conjuntan los datos obtenidos en las observaciones de los 4 filtros obtenidos, 2 filtros del pretratamiento por cada muestra de suelo y 2 filtros de la separación por densidad por cada muestra.

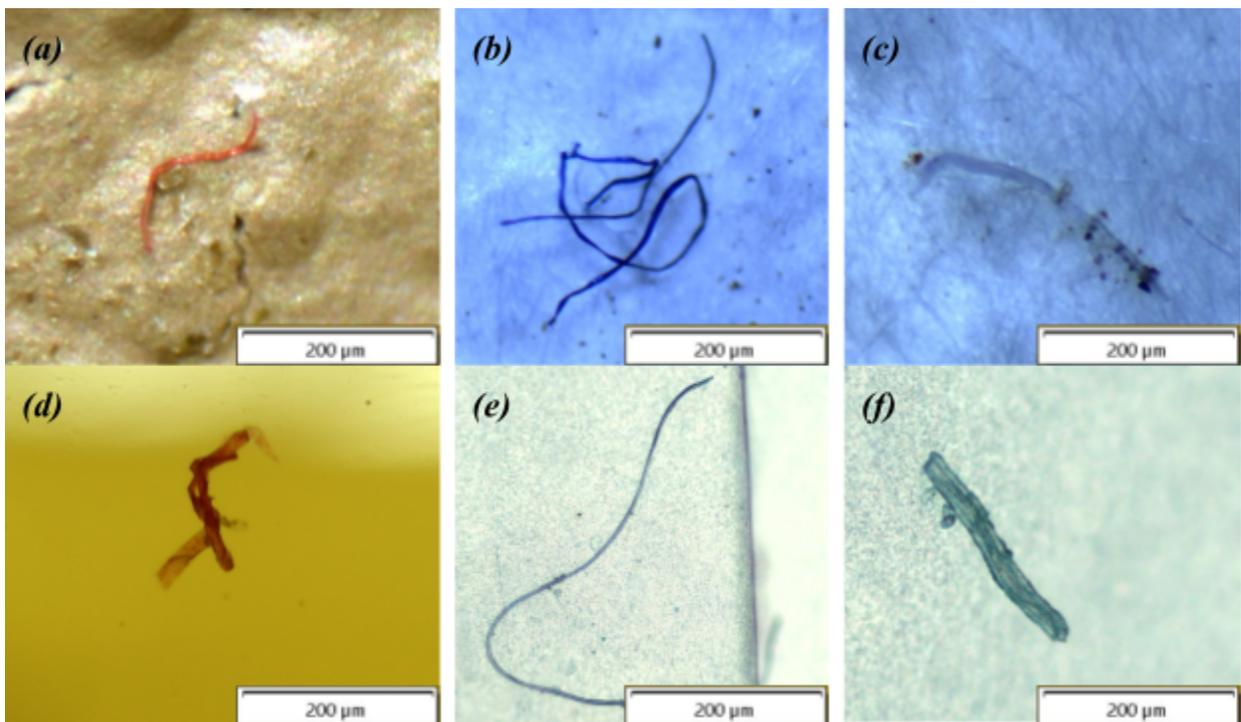


Figura 23. (a)(b)(c) Micrografías de estereoscopio a 4,5x evidenciados en la muestra de 15 g. (d)(e)(f) Micrografías de microscopía óptica a 10x (d) Filamento de pita plástica (e) Filamento de la tira plástica marrón. (f) Fragmento transparente de la bolsa plástica. Elaboración propia

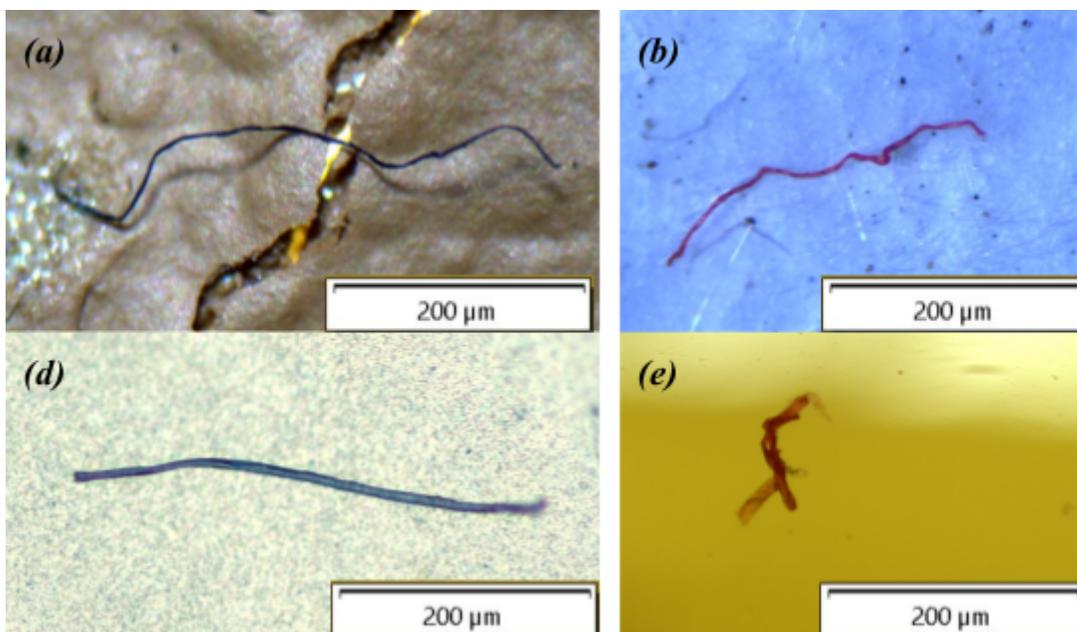


Figura 24. (a)(b) Micrografías de estereoscopio a 4,5x evidenciados en la muestra de 30 g (d)(e) Micrografías de microscopía óptica a 10x, (d) Filamento de la bolsa plástica. (e) Filamento de la pita plástica amarilla.

9.2.3. Discusión de resultados

Los estudios de investigación de microplásticos enfocados en la matriz suelo requieren garantizar calidad en sus procesos para obtener mayor confiabilidad en sus resultados, por ello según Praveena et al. (2022), la calidad del estudio va ser dado desde el contexto de la zona de estudio, el análisis del suelo, la caracterización del MPI y la correlación y puntualización de las condiciones consideradas para el estudio, en este caso, para el diseño de la metodología de extracción de MPI en el suelo de la Zona Bananera.

En este sentido, gracias a la visita en campo y las entrevistas realizadas, se logró identificar el contexto de la problemática asociada a microplásticos en suelos agrícolas, donde las prácticas inadecuadas de gestión de los residuos dentro de la finca bananera son la principal causa de acumulación de residuos plásticos en el suelo que por acciones de lluvia, exposición solar y viento se fragmentan y degradan hasta convertirse en MPI, así propiciando la acumulación de este contaminante emergente en la zona. Asimismo, otra fuente de MPI para la finca resulta siendo el agua para el riego del cultivo directamente del río Frío suministrada por la asociación Asoriofrio por medio de canales de flujo de agua (J.P. Granados, comunicación personal, 08 de junio de 2023).

De acuerdo con Arango Vargas (2015), en los cultivos destinados al banano de tipo de exportación, se aplica la técnica de embolsado para mejorar la calidad del producto por medio del uso de bolsas de polietileno de baja densidad (PEBD) con agroquímicos presentes con el fin de evitar el deterioro de la fruta por plagas. Esto se confirmó con la visita realizada, además se identificaron dos productos plásticos que terminan como residuos problemáticos para la finca, siendo estos la pita y las tiras plásticas identificadores de la etapa del racimo que causan un deterioro ambiental al acumularse en lugares inapropiados.

Con relación a lo anterior, Juan Pablo Granados, gerente de la finca, señala que el problema vinculado a los plásticos se centra principalmente en las pitas plásticas, cuya recolección y limpieza resultan complicadas para los trabajadores de la finca. Esto lleva a que opten por dejarlas en el suelo, lo que resulta en que permanezcan allí en un periodo indefinido, e incluso se ha descubierto que algunas quedan enterradas con el tiempo.

Además, señala Granados que las bolsas y tiras plásticas no resultan ser un punto crítico de contaminación, puesto que se hace la limpieza semanalmente para recogerlas y ser entregadas a la empresa de reciclaje. No obstante, con la observación en campo, se evidenció la ausencia de un manejo riguroso de estos productos plástico a base de polietileno en toda la extensión de la finca, creando así focos de contaminación en el suelo (Arango Vargas, 2015), por lo tanto, resulta importante implementar estrategias de sensibilización y buenas prácticas de manejo de residuos por parte de la finca junto con las entidades gubernamentales encargadas con el fin de evitar la contaminación plástica.

Con el fin de comprobar el tipo de polímero de los diferentes productos plásticos mencionados, se procedió a analizar su banda espectral obtenida, cuyos espectros infrarrojos representa gráficamente la longitud de onda (cm^{-1}) exacta donde los diferentes tipos de enlaces de átomos absorben la energía transmitida (%T) (Peña, 2023), permitiendo identificar la composición química de los materiales con la interpretación de las bandas de absorción. Así pues, se observa en la región de interés (1400 a 4000 cm^{-1}) enlaces de hidrocarburos alifáticos (C-H) con grupo metileno (CH_2), dentro del cual también se evidencia el enlace carbono simple (C-C), las cuales constituyen la estructura molecular del polietileno (Figura 22). En otras palabras, la bolsa, tira y pita plástica empleadas en la finca bananera de interés están compuestas de polietileno (PE), cuya densidad estaría entre $0,952$ – $0,965 \text{ g/cm}^3$ (Kurtz, 2015), sumado a esto por la literatura se conoce que las bolsas empleadas en el cultivo de banano son de polietileno de baja densidad (PEBD).

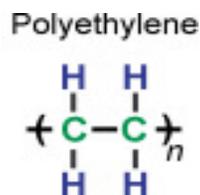


Figura 25. Estructura química del polietileno (PE)

Nota: Kurtz (2015)

Igualmente, los espectros infrarrojos se pueden equiparar con el espectro de frecuencia representado longitud de onda vs absorbancia de Zhang et al. (2022), quien establece que la determinación del polietileno (PE) por medio de la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) funciona como un espectro de referencia para las futuras investigaciones asociadas a la contaminación microplástica. De esta forma, se confirma que las tres muestras son de polietileno (PE).

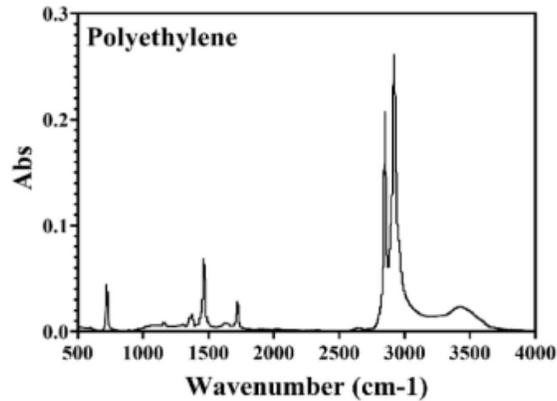


Figura 26. Espectro FTIR de polietileno (PE)

Nota: Zhang et al. (2022)

Por otro lado, el muestreo del suelo realizado durante la visita de campo se consideró hacerlo a 20 cm de profundidad acorde a la guía del IGAC, lo cual favoreció al momento de la determinación de la presencia de microplásticos, puesto que según Praveena et al. (2022), los estudios realizados hasta el momento utilizando una profundidad entre 0 a 20 cm han encontrado distribuciones laterales y verticales de microplásticos en el suelo. Además, al mantener las muestras almacenadas a temperatura ambiente no se generó ningún tipo de alteración a los MPI presentes en este (Praveena et al., 2022).

Para el proceso de la caracterización de los microplásticos, se utilizaron dos pesos diferentes de la muestra del suelo, una de 15 gramos y la otra de 30 gramos, puesto que según Lee et al. (2023) una diferencia en la cantidad de muestra sólida demuestra la distribución significativamente diferente de MPI. Esto se comprueba con los resultados de la cuantificación visual, puesto que se encontraron 123 MPI/mL en la muestra de 30 g, mientras que en la muestra de 15 g se contaron 103 MPI/mL, logrando establecer una relación entre la cantidad de suelo y MPI.

No obstante, es preciso aclarar la importancia del uso de la guía referencial para la correcta identificación del MPI, ya que este tipo de método de cuantificación presenta una tasa de error entre el 20 a 70%, aumentando por el tamaño de la partícula (Praveena et al., 2022). En este caso, se da validez a los datos obtenidos de cuantificación, debido a que los MPI encontrados en las muestras tienen un tamaño de 200 μm , permitiendo identificarlos fácilmente y por ende, el error del método se reduce para este estudio.

En relación con los resultados obtenidos, los microplásticos encontrados en la finca bananera corresponden a polietileno (PE), puesto que los filamentos de color rojo, azul y transparente de las muestras de suelo resultaron similares a las características morfológicas de la bolsa, tira y pita plástica empleadas en el cultivo de banano. Como lo afirman Fan et al. (2023), los estudios realizados en suelos agrícolas han demostrado la dominancia de MPI derivados del polietileno (PE), polipropileno (PP) y poliestireno (PS), principalmente en forma de fibras y fragmentos.

Con respecto a la caracterización del suelo, este criterio resulta importante para el análisis de los microplásticos y su impacto en los suelos destinados a la actividad agrícola, puesto que como bien esta esfera ambiental resulta ser un sumidero para los MPI se desconocen las consecuencias de su

acumulación para la productividad y calidad del suelo en cuestión (Zhang y Liu, 2018). El último análisis realizado del suelo de la finca “Vega Caballero” fue hace 5 años, no obstante se hizo netamente enfocado en las propiedades químicas de nitrógeno, fósforo, materia orgánica y carbono para establecer la tipología de fertilización y producto químico a utilizar en el cultivo (J.P, Granados, comunicación personal, 08 de junio de 2023).

El análisis realizado en el presente trabajo estará enfocado en determinar el impacto de la presencia y acumulación de MPI en el suelo agrícola, principalmente en las propiedades físicas como la estructura del suelo, densidad aparente, porosidad del suelo, textura y contenido de humedad, así como aquellas químicas de pH y materia orgánica, dado que son las que principalmente se han visto afectadas por la acumulación de MPI (Álvarez-Lopezello y Chávez-García, 2022).

La textura se define como aquella proporción entre las partículas de arena, limo y arcilla presentes en el suelo, donde va predominar una u otra fracción definiendo el tipo de textura de este a partir del cual se logran establecer aspectos relacionados a la fertilidad del suelo. En este caso, acorde a la tabla 7, el suelo de la finca es de textura franco arenoso con predominancia en arena con 66,7%, además según el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2015) esta clase franca resulta siendo óptima para la actividad agrícola, puesto que sus fracciones de arcilla se encuentra entre el rango de 7-27% con un valor de 8,3% y tiene fracción de limo entre 28 -50% con un dato de 25%, por lo cual su uso destinado para cultivo de banano resulta siendo el más óptimo en cuanto a productividad.

En este orden de ideas, los suelos arenosos suelen tener su pH alrededor de 6,0 (Guo et al., 2022), sin embargo acorde a la tabla 7, el suelo en cuestión presenta un pH de 6,5, valor que designa que se trata de un suelo ligeramente ácido (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2015). Esto puede deberse a muchos factores tanto climáticos como por las prácticas agrícolas, sin embargo el estudio realizado por Qi et al.(2020) demostró que la acumulación de MPI de polietileno de baja densidad (PEBD) aumentó el valor del pH del suelo, por consiguiente, se sugiere que la presencia de MPI derivado de la degradación de la bolsa de PEBD utilizada en el cultivo de banano puede estar generando un cambio en el pH del suelo.

Por otra parte, la estabilidad estructural del suelo se da por el cálculo de dos factores, el diámetro ponderado medio (DPM) y el estado de agregación (EA), donde para este suelo (Tabla 7) se obtuvo un DPM de 0,29, lo cual significa que el suelo es inestable (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2015), estando dentro de los parámetros normales de un suelo con fracción arenosa, puesto que “...el suelo arenoso tiene una estructura de poros pobre” (Guo et al., 2022).

Aunque, al ser un suelo inestable esto implica que los MPI pueden llegar acumularse en los espacios porosos del estado de agregación alterando la dinámica del suelo, dado que Guo et al. (2022) encontró que los microplásticos de tamaño 1-5 mm tienden a migrar a los grandes poros del suelo arenoso, perturbando en el sistema de porosidad hasta llegar a construir una nueva estructura, lo cual reduciría la uniformidad de poros y por ende, la retención de agua en el suelo.

Lo anterior se puede evidenciar con la retención de humedad del suelo en cuestión(Tabla 7), debido a que al obtener un valor de 12,26%, significa que tiene una capacidad de retención de agua baja (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2015), sin embargo, por la ubicación de la Zona Bananera, esta debería presentar una retención de humedad dentro del rango medio de 15-25 (%), lo cual

evidencia la alteración de la migración del MPI en los procesos biológicos, físicos y químicos dentro de los agregados del suelo, afectando así la dinámica agregada del suelo (Qiu et al., 2022).

Por otra parte, la densidad aparente del suelo es una de las propiedades del suelo mayormente afectadas por la presencia de MPI, siendo importante su evaluación para determinar el grado de impacto de este contaminante emergente, además su efecto sería consecutivo con la calidad y productividad del suelo, puesto que esta propiedad resulta ser un excelente índice de fertilidad del suelo (Qiu et al., 2022).

En este caso, la densidad aparente tiene un valor de $1,05 \text{ g/cm}^3$, resultando baja para la ubicación de la zona de estudio, puesto que según el mapa de densidad aparente del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2015), la Zona Bananera debería presentar una densidad entre $1,2-1,5 \text{ g/cm}^3$. Esto puede darse debido a que la densidad de la mayoría de los microplásticos de diferentes polímeros presentes en el suelo suelen ser inferiores a las de muchos minerales naturales (Qiu et al., 2022), permitiendo así su penetración en la matriz suelo fácilmente, siendo posible para el caso en cuestión, ya que se tiene un polímero de densidad de $0,952 - 0,965 \text{ g/cm}^3$, menor a la densidad del suelo.

Lo anterior, lo confirma Lozano et al. (2021b), quien ha establecido que existe una correlación negativa entre la exposición a MPI y una disminución de la densidad aparente del suelo, lo cual genera un aumento en la macroporosidad del suelo y aireación. Esto es evidente con el valor de porosidad del suelo obtenido a partir de la densidad real y aparente del suelo, en este caso resultó siendo de 64%, un valor exageradamente alto para suelos arenosos, debido a que usualmente la porosidad para este tipo de suelo se encuentra en el rango de 33-44% (Bruand, et al., 2005).

Este fenómeno sucede principalmente que al reducir la densidad aparente del suelo, propiedad que determina el volumen total del espacio libre del suelo, se genera un aumento significativo en estos permitiendo así que la migración de microplásticos ocupan los poros originales, reduciendo la disponibilidad de aire y capacidad de infiltración, puesto que estos polímeros pequeños bloquean los macroporos y reestructuran la capa porosa, además la capacidad hidrofóbica de los MPI permite que no se filtren ni circulen con el agua filtrada en el suelo (Wang et al., 2022).

De acuerdo con los resultados obtenidos, este estudio se ha logrado identificar la magnitud del problema en la Zona Bananera en cuanto a los microplásticos, enfatizando en la importancia de formular medidas de prevención y reducción para fomentar el cumplimiento nacional de los objetivos de desarrollo sostenible, especialmente debido a la ubicación del área dentro de la Ciénaga Grande Santa Marta (Garcés et al., 2022).

9.3. Resultados objetivo específico 3

9.3.1. Revisión Sistemática

Con el fin de plantear la metodología de extracción, se procedió a realizar la revisión sistemática establecida previamente, donde se seleccionaron 4 publicaciones en total para definir las etapas del procedimiento de extracción. Las bases de datos seleccionadas fueron Sciencedirect y Springer Link, puesto que fueron donde se encontró mayor información asociada a la extracción de microplásticos en suelos con la técnica de separación por densidad con base en aceite. A continuación, se muestra la hoja de ruta seguida para la revisión sistemática:

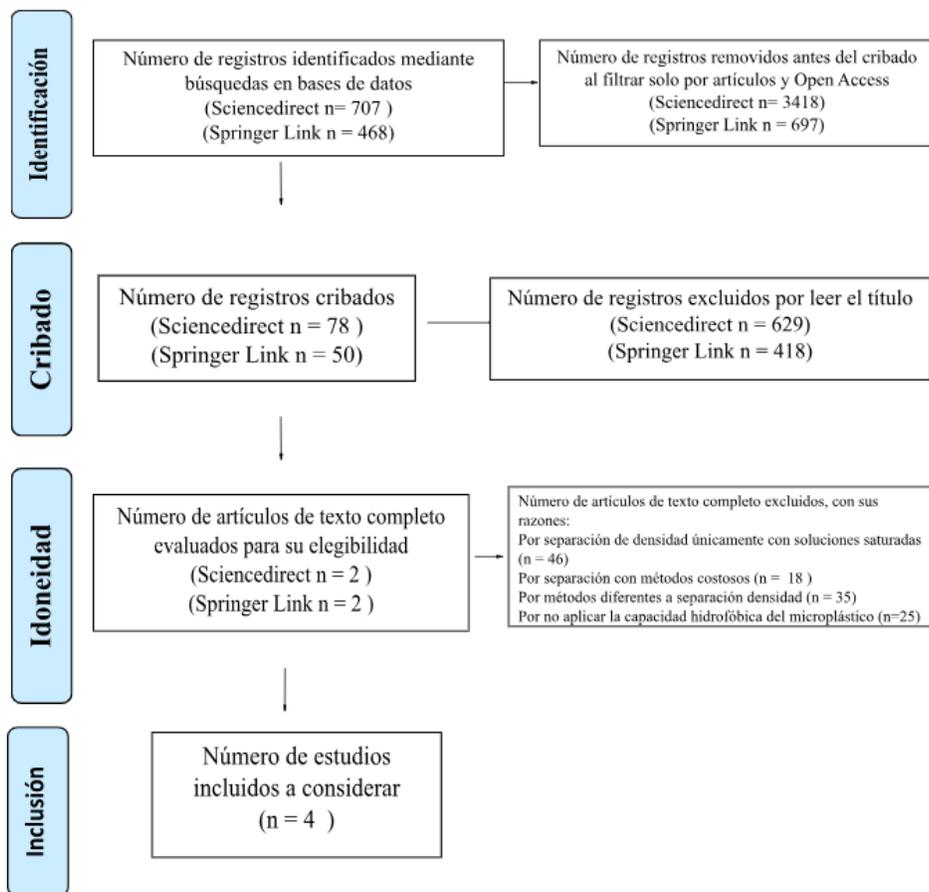


Figura 27. Diagrama de flujo PRISMA. Elaboración propia

Una vez definidos los artículos de interés, se extrajo la información (Tabla 8) sobre la metodología que implementan en sus estudios para extraer los microplásticos a escala de laboratorio con el propósito de obtener las variables y criterios a considerar en el diseño experimental de la metodología.

Tabla 8.
Información de los artículos seleccionados

Artículo	Metodología de extracción
----------	---------------------------

-
- | | |
|--------------------------------|---|
| Scopetani et al. (2020) | <ul style="list-style-type: none"> - Polímeros (PE, PU, PS, PC, PVC y PET) - Recipientes (Cilindros de politetrafluoroetileno (PTFE)) - Reactivos (Agua ultrapura (18,2 MΩ), aceite de oliva, hexano) - Procedimientos (Congelación a -40°C, filtración al vacío con microfibra de vidrio) - Identificación de MPI por FTIR - Oxidación de materia orgánica por protocolo de Fenton a la muestra de suelo |
| Prosenč et al. (2021) | <ul style="list-style-type: none"> - Polímeros (PEBD y PET) - Recipientes (Cilindro de politetrafluoroetileno (PTFE o teflón), cilindro de vidrio y una jeringa de plástico modificada.) - Reactivos (Agua destilada, aceite de oliva, hexano) - Procedimientos (Congelación a -18°C, filtración al vacío con microfibra de vidrio, centrifugación) - Identificación de MPI por Método HS-SPME–GC–MS - Oxidación de materia orgánica por reactivo de Fenton al filtro |
| Kononov et al. (2022) | <ul style="list-style-type: none"> - Polímeros (PEBD, PP y PVC) - Recipientes (Embudo de decantación) - Reactivos (Agua destilada, NaCl, aceite de canola, etanol 99,5%) - Procedimientos (Congelación a -18°C, filtración al vacío con microfibra de vidrio, sedimentación) - Identificación de MPI conteo y cuantificación de masa - Oxidación de materia orgánica con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) al 30% al filtro tras extracción |
| Yuan et al.(2022) | <ul style="list-style-type: none"> - Polímeros (Acilonitrilo butadieno estireno (ABS), PC, PP y PS) - Dispositivo extractor de MPI - Reactivos (Agua destilada,NaCl, aceite de oliva) - Procedimientos (Agitación magnética, filtración al vacío) - Identificación de MPI conteo - Oxidación de materia orgánica por secado a 550°C por 4 h |

Nota: Elaboración propia

9.3.2. Análisis multicriterio

Continuando con lo establecido en la metodología, se establecieron los criterios en la jerarquía de AHP (Figura 28) para establecer la metodología acorde a las alternativas, quienes resultan siendo los artículos escogidos. En este sentido, se establece el objetivo de diseñar una metodología de extracción considerando las evaluaciones anteriores en cuanto al suelo del área de estudio y el tipo de microplástico, igualmente unos criterios principales, a partir de los cuales va ser posible entablar la metodología deseada. Es preciso aclarar que no se definen subcriterios como establece la metodología de AHP, puesto que no se consideran necesarios.

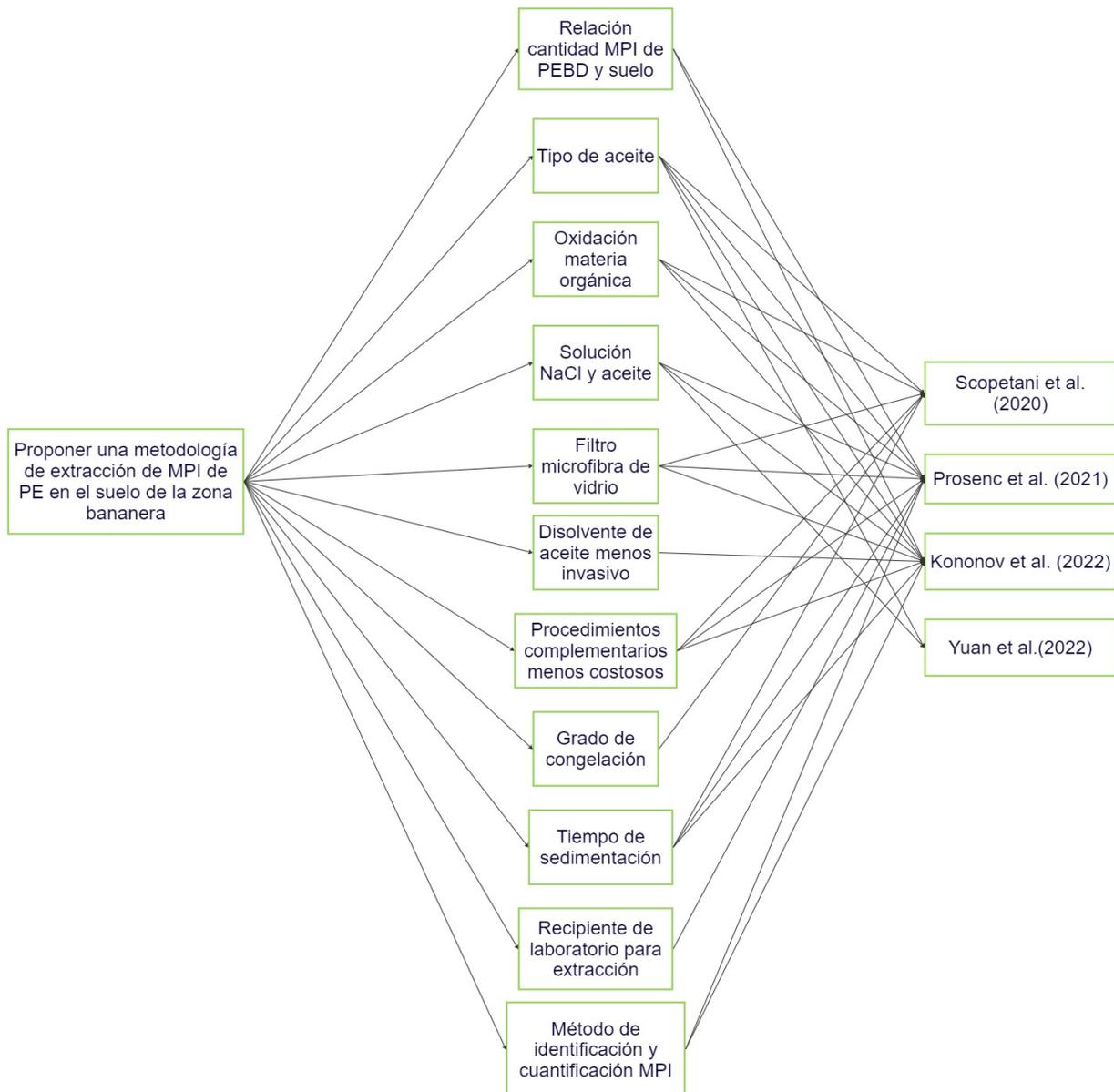


Figura 28. Criterios en jerarquía AHP. Elaboración propia

A partir de esta jerarquía, se extrajeron los parámetros empleados en cada metodología de los artículos seleccionados para escoger las cantidades, reactivos y procedimientos a llevar a cabo en la metodología a proponer. La selección de los criterios se dio gracias a los resultados obtenidos del software TotalDecision, el cual se le dio la clasificación a cada criterio contra cada alternativa con la escala de saaty hasta obtener la alternativa con mayor porcentaje (Figura 29).

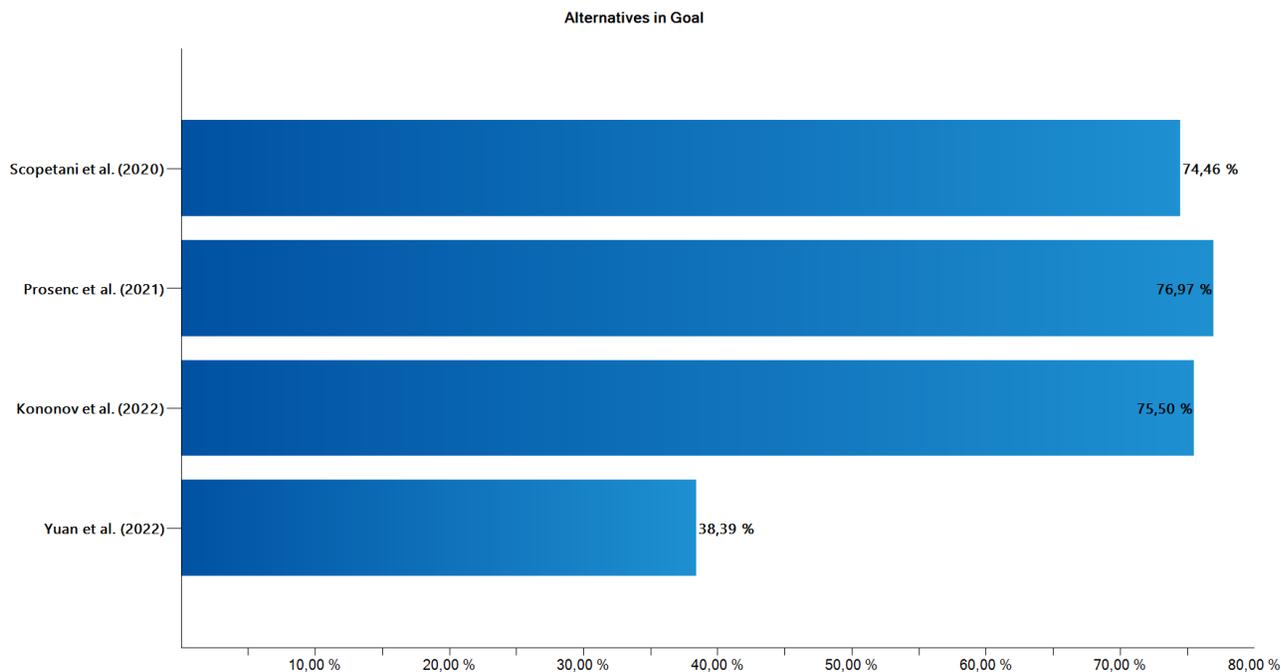


Figura 29. Selección de alternativas. Elaboración propia

Con respecto a esto, es preciso aclarar que no se toma una sola alternativa como opción, sino que se evalúa cual cumple mayormente con la escala establecida de importancia y priorización para la metodología a proponer a criterio del investigador. En este sentido, la mayoría de los parámetros establecidos por Prosenc et al. (2021) al presentar el mayor porcentaje de cumplimiento para llegar al objetivo, no obstante, las metodologías propuestas por Kononov et al. (2022) y Scopetani et al. (2020) al presentar unos porcentajes igualmente altos se consideran algunos aspectos de estos. La selección de los criterios por metodología se expresa por medio de un tabla (Tabla 9), donde se resalta en verde el aspecto elegido.

Tabla 9.

Parámetros de la metodología de extracción seleccionadas de los artículos seleccionados

Criterios	Metodologías de extracción de microplásticos por separación de densidad con base en aceite			
	Yuan et al. (2022)	Kononov et al. (2022)	Prosenc et al. (2021)	Scopetani et al. (2020)

Relación cantidad MPI y suelo	40 granulos x 10 g de suelo	0,08 g x 10 g de suelo	10 - 20 fragmentos x 10 g de suelo	6 micro polímeros x 25 g de suelo
Cantidad de solución saturada	100 mL (1,2 g/cm ³) NaCl	150 mL (5 g/L) NaCl	30 mL H ₂ O(destilada)	100 mL de agua ultrapura (18,2 MΩ)
Tipo de aceite	Aceite de oliva	Aceite de canola	Aceite de oliva	Aceite de oliva
Relación cantidad solución (NaCl) y aceite	5%	6,6%	10%	0,03%
Tipo de filtro	Filtro membrana microporosa de éster de celulosa	Filtro de microfibra de vidrio	Filtro de microfibra de vidrio	Filtro de microfibra de vidrio
Procedimientos complementarios	Dispositivo extractor de microplásticos (ME)	Decantación + Filtración + Disolvente de aceite + Predigestión filtro	Congelación + Retirar capa de aceite MPI + Filtración + Disolvente de aceite + Predigestión filtro	Predigestión muestras + Congelación + Retirar capa de aceite MPI + Filtración + Disolvente de aceite
Recipiente de laboratorio para extracción	NA	Embudo decantador	Cilindros de politetrafluoroetileno (PTFE); Cilindro de Vidrio; Jeringa Plástico modificada (50 mL)	Cilindros de politetrafluoroetileno (PTFE) + tapas extraíbles + pistón para expulsar la muestra
Sedimentación del suelo	NA	30 minutos	2 horas	2 horas
Grado de Congelación	NA	NA	-18 °C toda la noche	-40 °C por 2 horas
Disolvente residuos aceite	NA	Etanol (99,5%)	Hexano + Agua destilada	Hexano + Agua destilada
Oxidación materia orgánica	NA	Proceso de predigestión con peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) al 30% al filtro después de aplicar el método	Proceso de predigestión con 60 mL de Fenton a los filtros después de aplicar el método	Proceso de predigestión con Fenton a las muestras antes de aplicar el método

Identificación y cuantificación MPI

Observación de MPI flotantes y conteo visual

Cuantificación por masa de MPI flotantes

Método HS-SPME-GC-MS²

Espectrómetro FTIR Agilent Cary 630 + MPI en el cristal ATR

Tasa de recuperación

$$\eta_L = \frac{W_{LR}}{W_{ini}} \times 100 \quad R (\%) = \frac{N_{extracted}}{N_{spiked}} \times 100$$

Nota: Elaboración propia

En este orden de ideas, la selección de los criterios de Prosenc et al. (2021) se da inicialmente con la relación de la cantidad de microplásticos dispuesta en cuanto de suelo, puesto que este estudio al abarcar la extracción de polietileno de baja densidad (PEBD) permite establecer la cantidad de MPI de las bolsas plásticas azules fabricadas de PEBD del cultivo de banano considerando su forma de fragmento, lo cual resulta de mayor facilidad para la fabricación propia para el presente estudio. Con respecto a la cantidad de solución saturada para la separación, se escogió de 30 mL, pero en vez de usar agua destilada se utiliza la misma cantidad con la solución saturada de cloruro de sodio (NaCl), dado que se ha demostrado su eficiencia para tratar polímeros de baja densidad y no genera un impacto ambiental significativo (Thomas et al., 2020).

Continuamente, Prosenc et al. (2021) establece una relación entre la solución y el aceite del 10%, es decir, 3 mL del aceite en 30 mL, siendo la elección más práctica visible, puesto que al elegir jeringas plásticas de 50 mL para la metodología del presente estudio es fundamental que exista la diferencia de la capa de aceite dentro de la mezcla MPI-suelo-solución NaCl-aceite, además las jeringas permiten obtener un beneficio costo y es un material de fácil accesibilidad con su propia función de pistón. De igual forma, la elección del filtro de microfibra de vidrio resulta ser la opción más viable para la extracción de MPI, puesto que Thomas et al. (2020) ha manifestado que los filtros de fibra de vidrio son los más útiles para recoger partículas pequeñas, el cual ha sido utilizado igualmente en los estudios de Kononov et al. (2022) y Scopetani et al. (2020).

De esta forma, la elección del tipo de aceite resulta fundamental para establecer la eficiencia de recuperación de MPI, donde para este caso se eligió el aceite de canola empleado por Kononov et al. (2022), dado que en este estudio se demostró que tiene una eficiencia mayor (>90%) al aceite de oliva en cuanto a la extracción de PEBD.

Por otro lado, los procedimientos complementarios de la metodología de extracción son fundamentales para evaluar la eficiencia en términos de tiempo, consumo energético y uso de reactivos, para este estudio, se seleccionó el proceso establecido por Prosenc et al. (2021) donde se establece una congelación de la mezcla MPI-suelo-solución NaCl-aceite, cuyo grado de uso será el estipulado por el congelador disponible en las instalaciones de la universidad, siendo de -80°C. En cuanto a esto, se descarta la opción del proceso de decantación de Kononov et al. (2022), puesto que

² Cromatogramas de microextracción en fase sólida en espacio de cabeza, cromatografía de gases y espectrometría de masas (HS-SPME-GC-MS) (Prosenc et al., 2021)

la salida del embudo suele obstruirse fácilmente por el suelo mientras que la congelación simplifica el procesos de separación de la capa de aceite (Scopetani et al., 2020).

Sumado a esto, se define la filtración al vacío donde se emplea el filtro de fibra de vidrio e igualmente, se plantea el uso de un disolvente para eliminar los residuos de aceite, cambiando el hexano y etanol por uno más eficiente y menos dañino (Roth, 2022b). Por otro lado, la materia orgánica (MO) es un factor limitante en la extracción de microplásticos (Thomas et al., 2020), por lo que el paso de oxidación de MO es fundamental para una mayor eficiencia de recuperación, no obstante se opta por emplear el proceso de predigestión con peróxido de hidrógeno al 30% establecido por Kononov et al. (2022), debido a que se utiliza menor cantidad que emplear al inicio con las muestras de suelo y se obtiene menor residuo.

Además, como proceso complementario se elige el uso del disolvente para eliminar los residuos de aceite en el filtro, paso fundamental para evitar interferencias en la cuantificación de microplásticos tras la extracción, no obstante, tanto en Prosenc et al. (2021) como Scopetani et al. (2020) emplean el hexano como disolvente, un reactivo sumamente peligroso para la salud y el ambiente, motivo por el cual se propone utilizar una alternativa de solvente verde de este producto químico. En este sentido, se escogió el acetato de etilo, debido a que según Cascant-Vilaplana et al. (2017) descubrió que este resulta ser mejor disolvente alternativo por ser un producto orgánico y muestra índices elevados de extracción de lípidos similares a los obtenidos con hexano en el estudio.

Por último, para evaluar la eficiencia de recuperación se considera el método de identificación y cuantificación propuesto por Kononov et al. (2022) y Yuan et al. (2022), donde se hace por el método de conteo y cuantificación por masa, no obstante para el conteo se considerará la ecuación planteada por Prosenc et al. (2021).

9.3.3. Procedimiento de metodología propuesta

En este orden de ideas, se plantea la metodología propuesta acatando con los criterios seleccionados previamente sumado con otros pasos establecidos por Thomas et al. (2020) para una mejor eficiencia en la extracción de microplásticos. Esta metodología de extracción está planteada para considerar las condiciones del tipo de polímero que utilizan en el cultivo de banano y las características del suelo resultantes de los objetivos 1 y 2.

9.3.3.1 Preparación de microplásticos y muestra de suelo

Inicialmente, se prepararon las muestras de microplásticos de tamaño de 5 mm a partir de la muestra de bolsa plástica de azul fabricada de PEBD, las cuales se cortaron en dos formas diferentes acorde a lo establecido por Uribe (2020): Triángulo y cuadrado (Figura 30). En total, para cada ensayo, se recortaron 20 fragmentos, 10 en forma triangular y 10 en forma cuadrada.

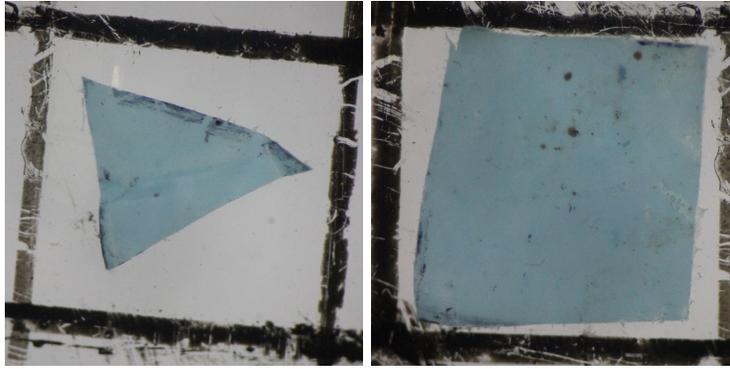


Figura 30. Muestra de microplástico en forma de triángulo y cuadrado. Elaboración propia

Posteriormente, se preparan las muestras de suelo al pasarlo por un tamiz de diámetro de 2 mm (Thomas et al., 2020) para homogeneizar la muestra y eliminar impurezas que interfieran en el proceso de extracción de microplásticos. Además, se lleva a secar 11 gramos de la muestra tamizada a una temperatura de 40°C por 24 h, evitando así la deformación de microplásticos muestra.

9.3.3.2. Etapas de extracción de microplásticos

Inicialmente, se prepara la solución de cloruro de sodio (NaCl) al 10% de aceite, partiendo de 7,5g de sal de cocina (NaCl) para ser disuelta paulatinamente en 30 mL de agua destilada, posteriormente a la solución, se le añade 3 mL de aceite de canola ($\rho=0,9 \text{ g/cm}^3$). Para el diseño experimental, se considera como recipiente extractor una jeringa plástica 50 mL modificada en la parte superior con un tapón para generar el sistema pistón. Consecutivamente, se añade a esta jeringa 10 g de la muestra sólida, 20 fragmentos de MPI de PEBD (triángulos y cuadrados) y la solución al 10% de NaCl y aceite de canola (Figura 32a), cuya mezcla se lleva al agitador Vortex para ser homogenizada y dejarla reposar por 2 horas hasta sedimentarse el suelo (Figura 32b). Transcurrido este tiempo, se lleva a congelar a -80°C por 1:30 h, luego empujar el mezcla congelada con el pistón de la jeringa para retirar la capa de aceite (Figura 32c), la cual se filtra al vacío con una bomba, embudo plástico y el filtro de microfibra de vidrio de Whatman (Diámetro 47 mm y porosidad 1,2 μm)(Figura 32d). Continuamente, se enjuaga con 1 mL acetato de etilo el filtrado obtenido para eliminar los residuos de aceite. Una vez esto, se realiza la oxidación de la materia orgánica con 10 mL de peróxido de hidrógeno al 30% (H_2O_2) para proceder con la identificación y cuantificación de los MPI extraídos, donde se registra el conteo visual de la cantidad de MPI flotantes en el filtro, simultáneamente se pesan los fragmentos de MPI extraídos.

A modo resumen de la metodología propuesta, se establecen las etapas físicas y químicas en una diagrama de procesos como se muestra a continuación.

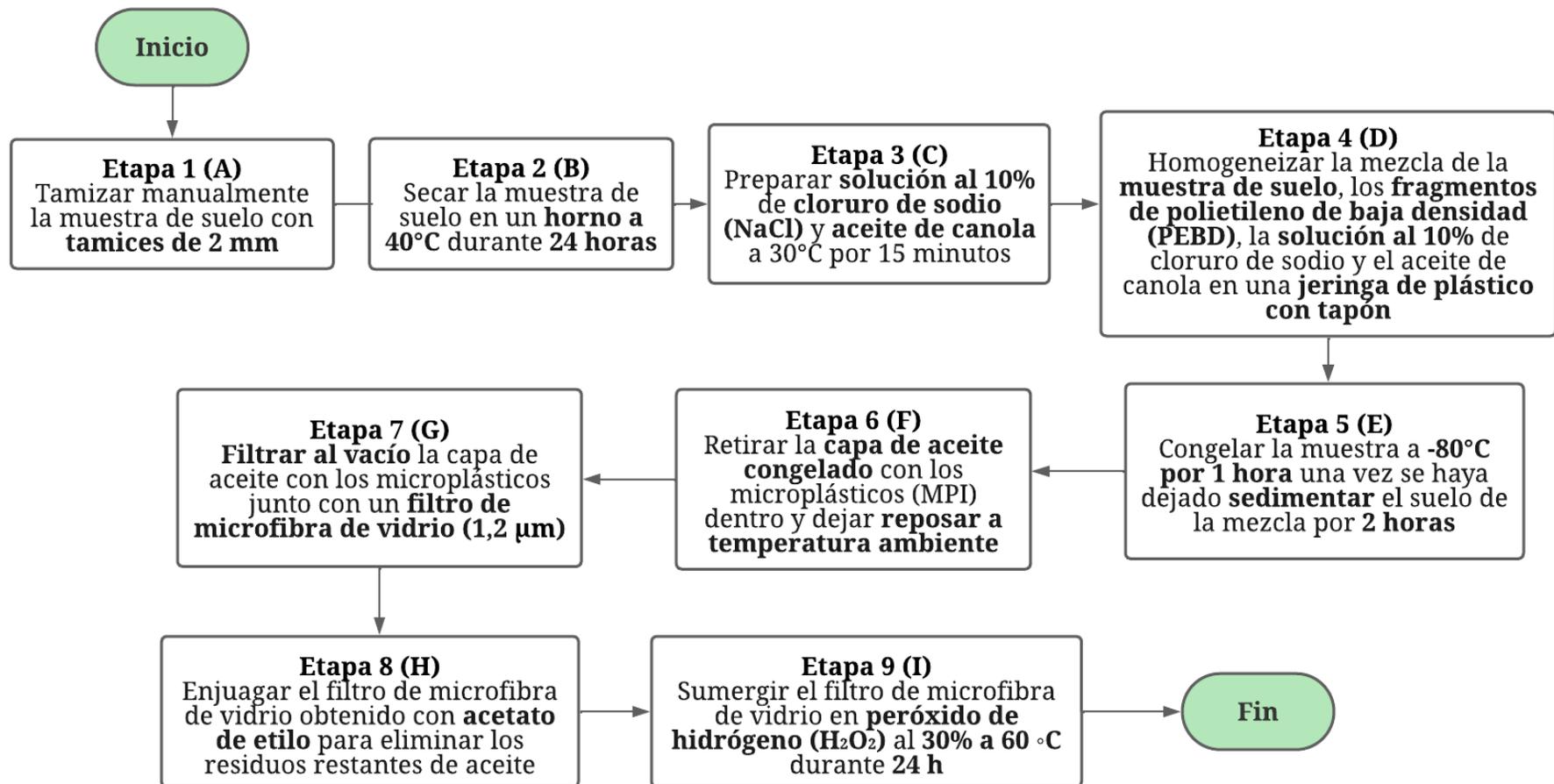


Figura 31. Diagrama de flujo del diseño de la metodología propuesta de extracción. Elaboración propia

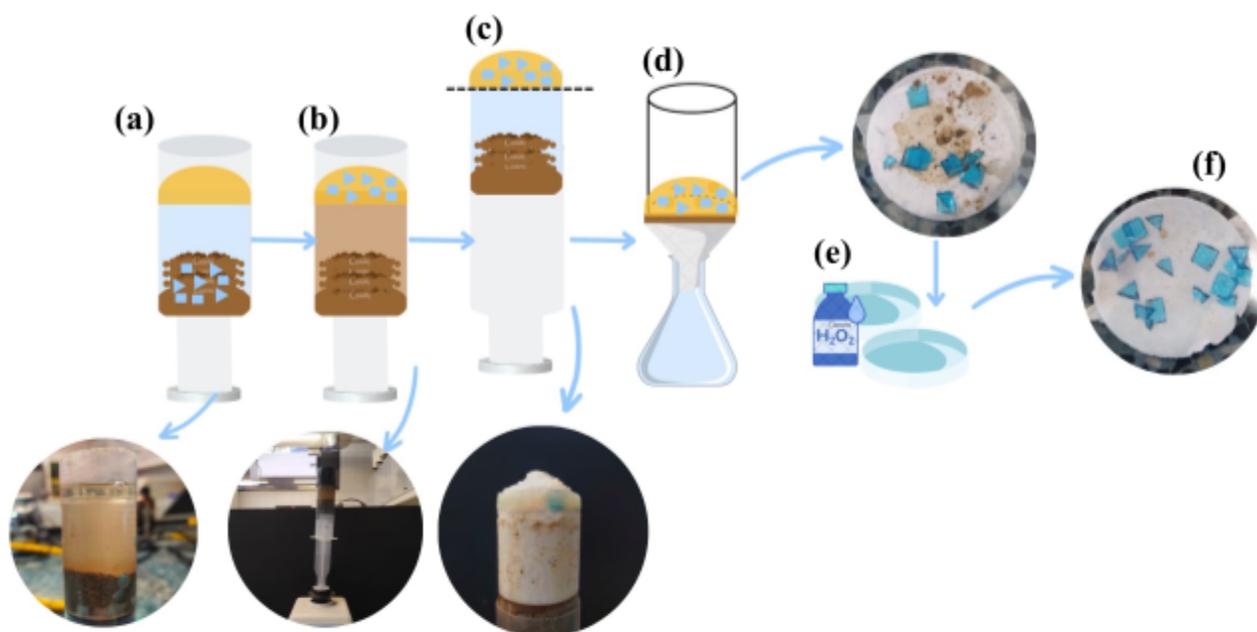


Figura 32. Diseño de la metodología propuesta de extracción. Elaboración propia

Una vez registrado los datos se procede a calcular la tasa de recuperación por conteo con la ecuación 13 (Prosenc et al., 2021), de igual forma la tasa de recuperación por cuantificación de masa con la ecuación 14 (Kononov et al., 2022).

$$R(\%) = \frac{N_{\text{extraídos}}}{N_{\text{iniciales}}} \times 100 \quad (13)$$

$$\eta_L = \frac{W_{\text{extraídos}}}{W_{\text{iniciales}}} \times 100 \quad (14)$$

9.3.3.3. Escenarios de la metodología: Aplicación directa y simulación

Para los ensayos experimentales, se consideran dos escenarios, inicialmente realizar la metodología propuesta de extracción sin simulación de condiciones reales a escala de laboratorio con el fin de poner en marcha la metodología y evidenciar la eficiencia de extracción por los dos métodos de cuantificación establecidos previamente. Como segundo panorama, se plantea hacer la metodología planteada con la simulación de condiciones reales del área de estudio en las muestras de suelo con los microplásticos con el objetivo de observar los cambios en la capacidad de extracción considerando otras circunstancias.

En el segundo caso, se considerará las condiciones de simulación planteadas por Uribe (2020), específicamente en cuanto a la radiación UV, quien contempló el diseño de una caja de negra (80 cm x 30cm x 30cm) con una lámpara de luz UV (0,68 W/m²- 60 cm) (Figura 33) para realizar la simulación de la radiación solar. Además, al tratarse de la matriz sólida, se considera la abrasión mecánica del suelo, la cual va ser simulada por un agitador shaker orbital a 120 rpm (Yuan et al., 2022) (Figura 33), sin embargo, se excluye la variable de temperatura manejando una temperatura

ambiente. La simulación se realizó en un intervalo de 12 horas con luz UV y 12 horas sin luz, de esta forma se llega a presentar la simulación real de la rotación día y noche.



Figura 33. Caja negra de simulación de condiciones experimentales. Elaboración propia

En este orden de ideas, se dispone 10 g de la muestra del suelo en un erlenmeyer de 250 mL con 20 fragmentos de muestras de microplásticos para llevarlas a simulación en la caja negra por 4 días en el cambio de intervalo de cada 12 horas.

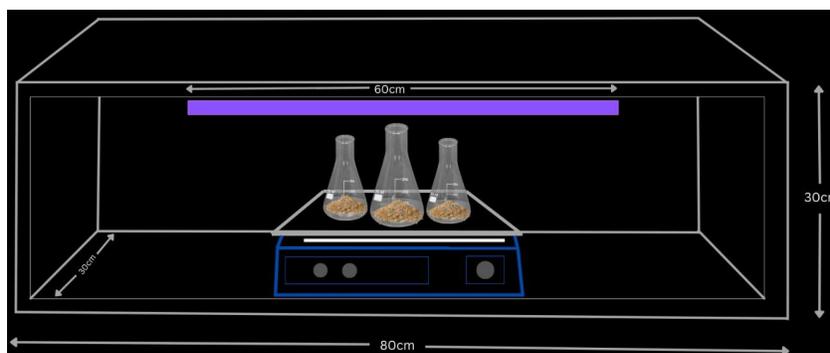


Figura 34. Diseño para la simulación de condiciones experimentales. Elaboración propia

9.3.4. Análisis estadísticos de los ensayos experimentales

Una vez planteada la metodología, se llevaron a cabo los ensayos experimentales por cada escenario planteado evaluando la eficiencia de recuperación por ambos métodos, en total se realizaron 12 ensayos, donde 6 fueron sin simulación mientras los otros 6 bajo simulación. Acorde a la metodología establecida, se utilizaron dos métricas estadísticas, desviación estándar y la prueba T-student a los resultados obtenidos de ambas situaciones, con la finalidad de obtener un intervalo de confianza de los datos recopilados en laboratorio.

9.3.4.1. Ensayos experimentales sin simulación

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los seis ensayos realizados sin simulación (Tabla 10), recopilando los valores iniciales de MPI dispuesto y su masa, a la par con los datos de los microplásticos extraídos en cuanto a su cantidad y peso. Al igual, se expone y compara la tasa de

eficiencia de recuperación por conteo y por cuantificación de masa junto con sus promedios y desviación estándar.

Tabla 10.

Resultados generales de los ensayos experimentales de la metodología propuesta de extracción de MPI sin simulación

N° Ensayos	N° MPI inicial	N° MPI extraído	Masa MPI inicial	Masa MPI extraídos	Eficiencia recuperación por conteo MPI	Eficiencia recuperación por cuantificación de masa MPI
Ensayo 1	20	15	0,00499	0,00395	75%	79,16%
Ensayo 2	20	12	0,00502	0,00356	60%	70,92%
Ensayo 3	20	11	0,00487	0,00301	55%	61,81%
Ensayo 4	20	9	0,00508	0,00319	45%	62,80%
Ensayo 5	20	14	0,00497	0,00410	70%	82,49%
Ensayo 6	20	15	0,00512	0,00457	75%	89,26%
Promedio					63%	74,40%
Desviación estándar					12,11%	11,08%

Nota: Elaboración propia

Por otra parte, al implementar muestras de microplásticos por formas, se obtuvo su eficiencia de recuperación por ambas técnicas acorde a la forma con el propósito de determinar su influencia en la extracción de MPI bajo la metodología planteada. Los datos obtenidos por la forma triangular (Tabla 11) y cuadrada (Tabla 12) de las muestras de microplásticos se presentan a continuación

Tabla 11.

Resultados por forma de los triángulos de los ensayos experimentales de la metodología propuesta de extracción de MPI sin simulación

N° Ensayos	N° MPI inicial	N° MPI extraído	Masa MPI inicial	Masa MPI extraídos	Eficiencia recuperación por conteo MPI	Eficiencia recuperación por cuantificación de masa MPI
Ensayo 1	10	8	0,00175	0,00154	80%	88,18%
Ensayo 2	10	6	0,00146	0,00122	60%	83,80%
Ensayo 3	10	4	0,00170	0,00076	40%	44,59%
Ensayo 4	10	2	0,00178	0,00048	20%	27,00%
Ensayo 5	10	6	0,00174	0,00117	60%	67,26%
Ensayo 6	10	6	0,00179	0,00120	60%	66,96%
Promedio					53%	62,96%
Desviación estándar					20,66%	23,39%

Nota: Elaboración propia

Tabla 12.

Resultados por forma de cuadrado de los ensayos experimentales de la metodología propuesta de extracción de MPI sin simulación

N° Ensayos	N° MPI inicial	N° MPI extraído	Masa MPI inicial	Masa MPI extraídos	Eficiencia recuperación por conteo MPI	Eficiencia recuperación por cuantificación de masa MPI
Ensayo 1	10	7	0,00324	0,00238	70%	73,38%
Ensayo 2	10	6	0,00356	0,00234	60%	65,65%
Ensayo 3	10	7	0,00317	0,00225	70%	71,08%
Ensayo 4	10	7	0,00330	0,00271	70%	82,07%

Ensayo 5	10	8	0,00323	0,00293	80%	90,70%
Ensayo 6	10	9	0,00333	0,00337	90%	101,26%
Promedio					73%	80,69%
Desviación estándar					10,33%	13,40%

Nota: Elaboración propia

Por otro lado, para una mayor confiabilidad de los datos se aplica la desviación estándar, métrica que permite determinar que tan dispersos están los datos con respecto a su media, además al sumarlo y restarlo con el promedio se puede obtener un intervalo de confianza, donde se incluyen aquellos ensayos representativos para el estudio. En este caso, a nivel general para la técnica por conteo se obtuvo un intervalo de 51% - 63,32%, donde se excluye únicamente el ensayo 1 en cambio para el procedimiento de cuantificación por masa, cuyo intervalo es de 75% - 85,49%, descartando los ensayos 1, 2 y 6. De igual forma, se realizó para los datos obtenidos según la forma triangular y cuadrada, donde para ambos se descarta el ensayo 1 y 6 e igualmente, se evidencia una mayor eficiencia de recuperación para los cuadrados (>73%) que en triángulo (>55%).

Una vez realizado el descarte de los valores con mayor dispersión, se saca el promedio con los datos establecidos con mayor confiabilidad para una mejor representación gráfica de la eficiencia de recuperación tanto por conteo como por cuantificación (Tabla 13), donde se evidencia igualmente que la técnica por cuantificación por masa con un valor de 77,52% resulta más eficiente que por conteo con un valor de 67%. Además, se calculó la desviación estándar nuevamente para calcular la incertidumbre por medio de la prueba T-student, obteniendo un valor para el conteo de 11,28% y para la determinación por masa de 14,81%. Igualmente, se realizó para los datos obtenidos según la forma (Triángulo y cuadrado), cuya incertidumbre más representativa para la forma triangular.

Tabla 13.

Descarte de valores estadísticos para mejorar la confiabilidad de los ensayos experimentales sin simulación por desviación estándar

	Eficiencia de recuperación por el método de conteo de MPI				Eficiencia de recuperación por el método de cuantificación de masa de MPI			
	Nº Ensayos confiables	Promedio	Desviación Estándar	Incertidumbre T-student	Nº Ensayos confiables	Promedio	Desviación Estándar	Incertidumbre T-student
General	Ensayo 2				Ensayo 3			
	Ensayo 3				Ensayo 4	77%	5,96%	14
	Ensayo 4	67%	9,08%	11	Ensayo 5			
	Ensayo 5							
	Ensayo 6							
Triángulo	Ensayo 2				Ensayo 2			
	Ensayo 3	55%	10,00%	15	Ensayo 3	66%	16,10%	25
	Ensayo 4				Ensayo 4			
	Ensayo 5				Ensayo 5			
Cuadrado	Ensayo 2				Ensayo 2			
	Ensayo 3	73%	5,00%	7	Ensayo 3	79%	8,95%	14
	Ensayo 4				Ensayo 4			
	Ensayo 5				Ensayo 5			

Nota: Elaboración propia

Con los valores de la Tabla 13, puntualmente del promedio e incertidumbre, se graficaron las eficiencias de recuperación acorde al método por conteo y por cuantificación de masa en el escenario de aplicación directa (Figura 35), donde se evidencia que es mayor la tasa de recuperación por cuantificación de masa en vez de conteo, empero la incertidumbre es menor para la técnica de conteo.

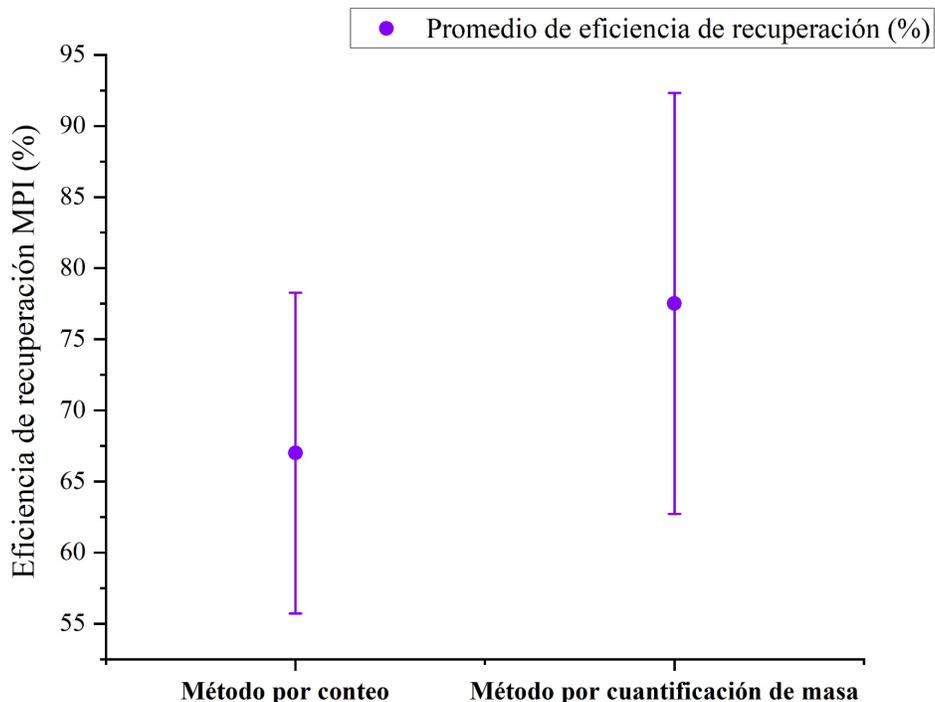


Figura 35. Eficiencia de recuperación entre método por conteo y por cuantificación de masa sin simulación en general. Elaboración propia

Además, se representaron gráficamente las tasas de recuperación según la forma triangular y cuadrada (Figura 36), donde logra observar que existe una mayor recuperación porcentual de los cuadrados que triángulos, así como se muestra que la incertidumbre es más significativa para las muestras de microplásticos extraídas con la forma del triángulo en vez del cuadrado. De igual forma, independientemente de la forma, se continúa evidenciando que existe una mayor eficiencia de recuperación por medio de la determinación de la masa que por conteo visual.

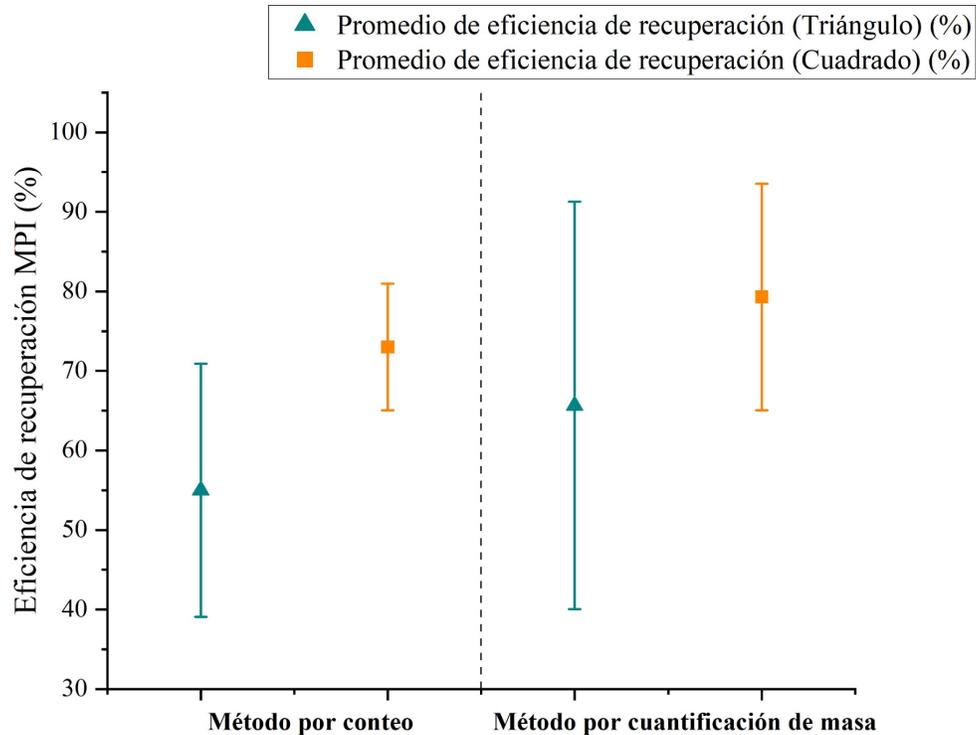


Figura 36. Eficiencia de recuperación entre método por conteo y por cuantificación de masa sin simulación según la forma cuadrada y triangular. Elaboración propia

9.3.4.2. Ensayos experimentales bajo simulación

En este orden de ideas, se presentan los resultados obtenidos de los seis ensayos realizados bajo simulación (Tabla 14), recopilando los valores iniciales de MPI dispuesto y su masa, a la par con los datos de los microplásticos extraídos en cuanto a su cantidad y peso. Al igual, se expone y compara la tasa de eficiencia de recuperación por conteo y por cuantificación de masa junto con sus promedios y desviación estándar

Tabla 14.

Resultados de los ensayos experimentales de la metodología propuesta de extracción de MPI bajo simulación

N° Ensayos	N°MPI inicial	N° MPI extraído	Masa MPI inicial	Masa MPI extraídos	Eficiencia recuperación por conteo MPI	Eficiencia recuperación por cuantificación de masa MPI
Ensayo 1	20	15	0,00500	0,00398	75%	79,60%
Ensayo 2	20	12	0,00506	0,00332	60%	65,61%

Ensayo 3	20	15	0,00477	0,00402	75%	84,28%
Ensayo 4	20	11	0,00449	0,00274	55%	61,02%
Ensayo 5	20	10	0,00417	0,00279	50%	66,91%
Ensayo 6	20	12	0,00434	0,00342	60%	78,80%
Promedio					63%	72,7%
Desviación estándar					10,37%	9,37%

Nota: Elaboración propia

Por otro lado, al implementar muestras de microplásticos por formas, se obtuvo su eficiencia de recuperación por ambas técnicas acorde a la forma con el propósito de determinar su influencia en la extracción de MPI bajo la metodología planteada. Los datos obtenidos por la forma triangular (Tabla 15) y cuadrada (Tabla 16) de las muestras de microplásticos se presentan a continuación.

Tabla 15.

Resultados por forma de triángulo de los ensayos experimentales de la metodología propuesta de extracción de MPI bajo simulación

N° Ensayos	N°MPI inicial	N° MPI extraído	Masa MPI inicial	Masa MPI extraídos	Eficiencia recuperación por conteo MPI	Eficiencia recuperación por cuantificación de masa MPI
Ensayo 1	10	8	0,00175	0,00159	80%	90,86%
Ensayo 2	10	6	0,00147	0,00094	60%	64,06%
Ensayo 3	10	8	0,00167	0,00150	80%	89,85%
Ensayo 4	10	5	0,00157	0,00062	50%	39,45%
Ensayo 5	10	5	0,00146	0,00078	50%	53,44%
Ensayo 6	10	5	0,00125	0,00080	50%	64,00%
Promedio					62%	66,94%

Desviación estándar	14,72%	20,26%
----------------------------	--------	--------

Nota: Elaboración propia

Tabla 16.

Resultados por forma de cuadrado de los ensayos experimentales de la metodología propuesta de extracción de MPI bajo simulación

N° Ensayos	N°MPI inicial	N° MPI extraído	Masa MPI inicial	Masa MPI extraídos	Eficiencia recuperación por conteo MPI	Eficiencia recuperación por cuantificación de masa MPI
Ensayo 1	10	7	0,00324	0,00238	70%	73,38%
Ensayo 2	10	6	0,00356	0,00234	60%	65,65%
Ensayo 3	10	7	0,00317	0,00225	70%	71,08%
Ensayo 4	10	7	0,00330	0,00271	70%	82,07%
Ensayo 5	10	8	0,00323	0,00293	80%	90,70%
Ensayo 6	10	9	0,00333	0,00337	90%	101,26%
Promedio					63%	75,44%
Desviación Estándar					8,16%	6,62%

Nota: Elaboración propia

Asimismo como se hizo para el anterior escenario, se aplica la desviación estándar para obtener una mayor confiabilidad de los datos. En este caso, a nivel general para la técnica por conteo se obtuvo un intervalo de 52,13%-72,87%, donde se excluye el ensayo 5 y 6 en cambio para la cuantificación por masa, cuyo intervalo es de 63,33%-82,07%, se descartando los ensayos 2 y 6. De igual forma, se realizó para los datos obtenidos según la forma, donde para los triángulos se obtuvo un rango por conteo de 46,95%-76,39%, excluyendo los ensayo 5 y 6, mientras que por método de masa con un rango de 46,69%-87,20%, se descarta únicamente el ensayo. Para los cuadrados, con un intervalo de confianza para el primer método de 55%- 71% se prescinde de los ensayos 1,5 y 6, a diferencia del segundo método, cuyo intervalo de 68,82%-82,06% permite retirar el ensayo 1 y 6.

Una vez realizado el descarte de los valores con mayor dispersión, con los promedios de mayor confiabilidad de la eficiencia de recuperación tanto por conteo como por cuantificación (Tabla 17), se evidencia igualmente que la técnica por cuantificación por masa con un valor de 77,52% resulta más

eficiente que por conteo con un valor de 67%. Asimismo, se evidencia una mayor eficiencia de recuperación para los cuadrados (>60%) que en triángulo (>53%). Además, se calculó la desviación estándar nuevamente para calcular la incertidumbre por medio de la prueba T-student, obteniendo un valor para el conteo de 7,62% y para la determinación por masa de 11,93%. Igualmente, se realizó para los datos obtenidos según la forma (Triángulo y cuadrado), cuya incertidumbre más representativa para ambos fue con el método por conteo.

Tabla 17.

Descarte de valores estadísticos para mejorar la confiabilidad de los ensayos experimentales bajo simulación por desviación estándar

	Eficiencia de recuperación por el método de conteo de MPI				Eficiencia de recuperación por el método de cuantificación de masa de MPI			
	N° Ensayos confiables	Promedio	Desviación Estándar	Incertidumbre T-student	N° Ensayos confiables	Promedio	Desviación Estándar	Incertidumbre T-student
General	Ensayo 1 Ensayo 2 Ensayo 3 Ensayo 4	56%	4,79%	7	Ensayo 1 Ensayo 3 Ensayo 4 Ensayo 5	73%	7,50%	11
Triángulo	Ensayo 1 Ensayo 2 Ensayo 3 Ensayo 4	53%	5,00%	7	Ensayo 2 Ensayo 3 Ensayo 4 Ensayo 5 Ensayo 6	66%	5,48%	6
Cuadrado	Ensayo 2 Ensayo 3 Ensayo 4	60%	6,11%	15	Ensayo 2 Ensayo 3 Ensayo 4 Ensayo 5	75%	3,97%	6

Nota: Elaboración propia

Con los valores de la Tabla 17 puntualmente del promedio e incertidumbre, se graficaron las eficiencias de recuperación acorde al método por conteo y por cuantificación de masa en el escenario de simulación de condiciones experimentales definidas en general (Figura 37), donde se evidencia que es mayor la tasa de recuperación por cuantificación de masa en vez de conteo, empero la incertidumbre es mayor para la técnica por masa.

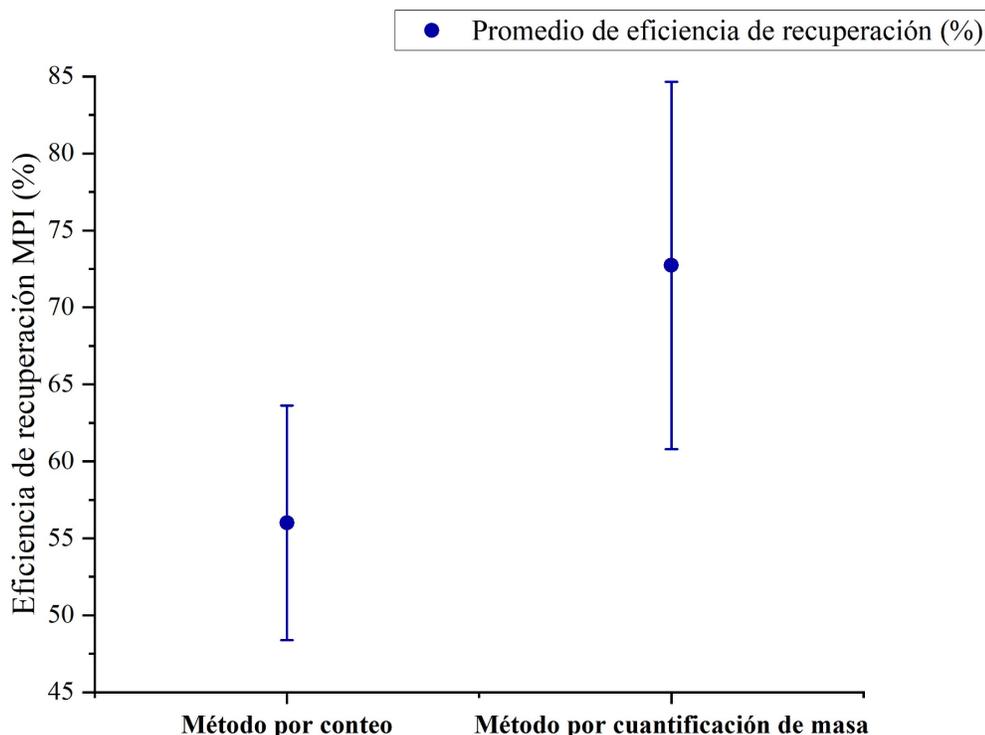


Figura 37. Eficiencia de recuperación entre método por conteo y por cuantificación de masa sin simulación en general. Elaboración propia

De igual forma, se graficaron las tasas de recuperación según la forma triangular y cuadrada (Figura 38), donde logra observar que existe una mayor recuperación porcentual de los cuadrados que triángulos, así como se muestra que la incertidumbre es más significativa para las muestras de microplásticos extraídas con la forma del triángulo en vez del cuadrado. De igual forma, independientemente de la forma, se continúa evidenciando que existe mayor eficiencia de recuperación por medio de la determinación de la masa que por conteo visual.

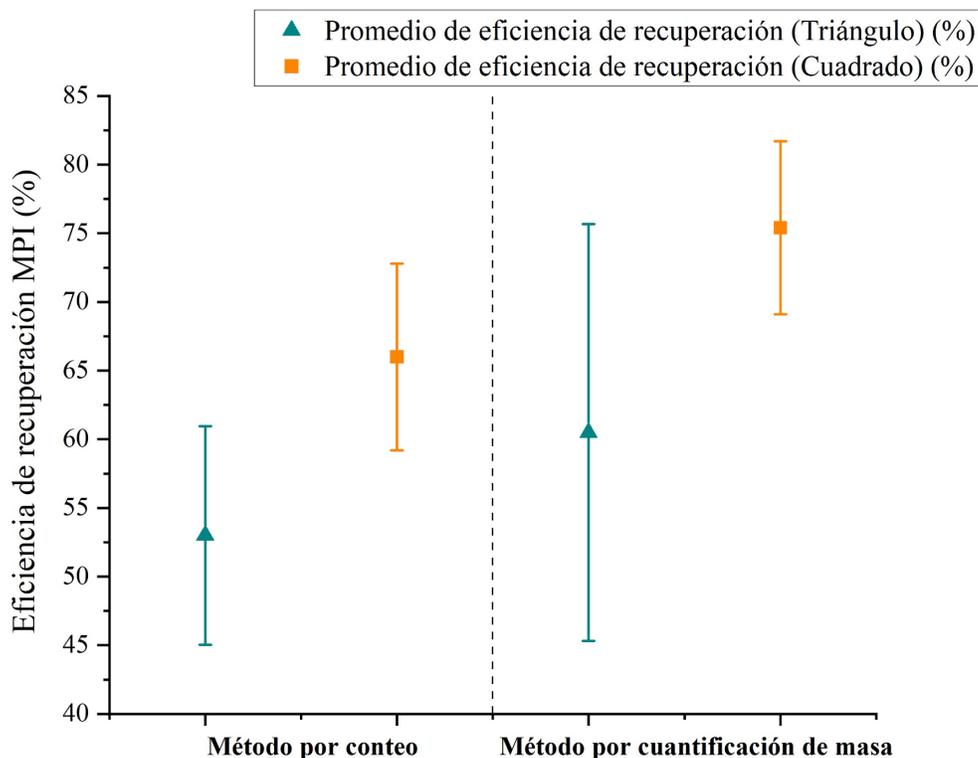


Figura 38. Eficiencia de recuperación entre método por conteo y por cuantificación de masa sin simulación según la forma cuadrada y triangular. Elaboración propia

9.3.5. Evaluación de criterios de sostenibilidad basado en la química verde

La metodología propuesta de extracción de MPI en el suelo apunta a obtener una sostenibilidad del proceso acorde a la química verde, puesto que esta resulta ser una herramienta de evaluación de los procesos físicos y químicos que den lugar a procedimientos más eficientes, menos dañinos para el ambiente y cumplan con los principios establecidos de esta ciencia como criterios de sostenibilidad.

De esta forma, acorde a la metodología planteada, se seleccionan los principios pertinentes para la estimación semicuantitativa de sostenibilidad de este (Tabla 18), donde inicialmente se excluye el principio 3, puesto que no se realizan síntesis químicas para diseñar y generar sustancias químicas menos perjudiciales para la salud y el ambiente, además, el proceso químico que se lleva a cabo es de mezcla de reactivos químico, más no reacción química. También, no se toma en cuenta los principios 4 y 11, dado que no se prepara ningún producto nuevo durante el procedimiento ni es su objetivo principal. Igualmente, al no haber procesos químicos de síntesis, no se contemplan los principios 8 y 9, dado que no se utilizan ningún tipo de catalizadores ni derivatización de la etapa química. Así pues, se evalúan 7 principios de la química verde como criterios de sostenibilidad para la metodología en cuestión, cada una con su puntuación correspondiente acorde a Ribeiro et al. (2010).

Tabla 18.
Puntuación de principios de la química verde a evaluar

Principios	Criterios	Puntuación
	Los residuos son inocuos (S=1, tabla 5)	3
P1	Los residuos suponen un riesgo moderado para la salud humana y el medio ambiente (S=2, tabla 5 al menos una sustancia)	2
	Los residuos implican un alto riesgo para la salud humana y el medio ambiente (S=3, tabla 5 al menos una sustancia)	1
	Reacciones sin exceso de reactivos (<10%) y sin formación de subproductos	3
P2	Reacciones sin exceso de reactivos (<10%) y con formación de subproductos	2
	Reacciones con exceso de reactivos (>10%) y sin formación de subproductos	2
	Reacciones con exceso de reactivos (>10%) y con formación de subproductos	1
	No se utilizan disolventes ni sustancias auxiliares, pero si se utilizan son inocuos (S=1, tabla 5)	3
P5	Se utilizan disolventes y/o sustancias auxiliares pero tienen un riesgo moderado para la salud humana y el medio ambiente (S=2, tabla 5 al menos una sustancia)	2
	Al menos un disolvente o sustancia auxiliar tiene un alto riesgo para la salud humana y el medio ambiente (S=3, tabla 5)	1
	Temperatura y presión ambiente	3
P6	Presión y temperatura ambiente entre 0 y 100 °C cuando se necesita refrigeración o calefacción	2
	Presión diferente a la presión ambiente y/o temperatura >100°C o menos de 0°C	1
	Todas las sustancias implicadas son renovables (S=1, Tabla 6)	3
P7	Al menos una sustancia involucrada es renovable, no se considera el agua (S=1, Tabla 6)	2

	Ninguna de las sustancias involucradas es renovable, el agua no se considera S=3,Tabla 6)	1
	Todas las sustancias son degradables y se descomponen en productos inocuos (S=1,Tabla 6)	3
P10	Todas las sustancias no degradables podrán ser tratadas para hacerlas degradables en productos inocuos (S=2,Tabla 6)	2
	Al menos una sustancia no es degradable ni puede ser tratada para hacerla degradable en productos inocuos (S=3,Tabla 6)	1
	Las sustancias utilizadas tienen un riesgo bajo de provocar accidentes químicos (S=1,Tabla 5)	3
P12	Las sustancias utilizadas tienen un riesgo moderado de provocar accidentes químicos (S=2,Tabla 5, para al menos una sustancia)	2
	Las sustancias utilizadas tienen un alto riesgo de provocar accidentes químicos (S=3,Tabla 5, para al menos una sustancia)	1

Nota: (Ribeiro et al., 2010)

9.3.5.1. Diagnóstico del proceso de la metodología propuesta de extracción de MPI en la matriz suelo

La semicuantificación de sostenibilidad parte del cálculo de la estrella verde, el cual acorde a lo establecido en la metodología del presente proyecto, inicialmente se realizó el listado y clasificación de las sustancias químicas presentes en el desarrollo de la metodología de extracción planteada (Tabla 19), cada una con su respectivo puntaje acorde a las fichas de seguridad y los criterios de las tablas 5 y 6.

Tabla 19.

Puntuación de sustancias empleadas para la construcción de la estrella verde de la metodología propuesta de extracción de MPI

Reactivos	Símbolos	Salud Humana	Ambiente	Accidente Químico	Degradabilidad	Renovabilidad
Reactivos Estequiométricos						
Cloruro de sodio	Xi	2	2	1	2	3
Aceite de canola		1	2	2	1	3

Sustancias Auxiliares

Acetato de etilo		2	2	2	1	1
Agua destilada		1	1	1	1	1
Peróxido de hidrógeno	Xi-O	2	2	2	2	3

Nota: Elaboración propia adaptado de Ribeiro et al. (2010)

A continuación, considerando la calificación de las tablas anteriores, se determinó los valores de los principios por cada procedimiento de la metodología, siendo en un total de 9 pasos evaluados cada uno con los principios que se considere aplicable (Tabla 20). Posteriormente, se procede a sacar un promedio de todos los valores recolectados del mismo principio (Tabla 21), es decir, que para el principio 1 se realizó la sumatoria de todas las valoraciones recibidas a lo largo de la metodología y luego de esto, se dividió por el número de valoraciones sumadas, de esta forma se obtiene el promedio por cada principio, lo cual va permitir realizar el radial de la estrella verde.

Tabla 20.

Matriz de diagnóstico de la metodología planteada de extracción de MPI por el método de densidad a base de aceite

Etapas	Carácter	CE (Wh)	E	S	Riesgo a la salud humana y ambiente		Riesgo de potenciales accidentes químicos		Degradabilidad y renovabilidad		Principios Evaluados		
					SH	A	I	RA	D	RE			
A Tamizar manualmente la muestra de suelo con tamices de 2 mm	Físico	0	Muestra de suelo completa sin tamizar	Muestra de suelo tamizada y homogenizada	NP	NP	NP	NP	NP	Si	P1 (3) P6 (3) P7 (3)		
B Secar la muestra de suelo en un horno a 40°C durante 24 horas	Físico	1800	11 gramos de muestra de suelo tamizado en una cápsula de porcelana	10 gramos de suelo seco y libre de humedad	NP	NP	NP	NP	NP	Si	P1 (3) P6 (2) P7 (3)		
C Preparar solución al 10% de cloruro de sodio y aceite a 30°C por 15 minutos	Químico	850	30 mL de agua destilada, 7.5 gramos de NaCl y 3 mL de aceite de	Solución de NaCl y aceite de canola al 10%		Mantener el producto alejado de los desagües	Cloruro de Sodio		NP	NP	NP	NP	P1 (2) P2 (3) P5 (3) P6 (2) P7 (2) P10 (2) P12 (3)

				muestra plástica traída de la finca (bolsa azul - PEBD), solución al 10% de NaCl y aceite de canola	la jeringa plástica	suelo simulado						
E				Jeringa plástica con la mezcla reposada y separado sus componentes	Jeringa plástica con la mezcla congelado	Exposición al frío extremo sin el uso de los suplementos personales necesarios	Consumo masivo de energía eléctrica por el congelador	NP	NP	NP	NP	P6 (1) P7 (2) P10 (2) P12 (3)
F				Muestra congelada completamente retirada	Capa de aceite congelada con los MPI	Mantener el producto alejado de los desagües		NP	NP	NP	NP	P1 (3) P6 (3) P7 (2) P10 (2)

	temperatura ambiente			dentro de esta		y de las aguas superficiales y subterráneas.							
G	Filtrar al vacío la capa de aceite con los microplásticos junto con un filtro de microfibras de vidrio	Físico	100	Capa de aceite con microplásticos descongelada y un filtro de microfibras de vidrio (47 mm-1,2 µm de porosidad)	Filtro de microfibras de vidrio con los MPI extraídos y residuos restantes de aceite	Acumulación y contaminación controlada de microplásticos	NP	NP	NP	NP	NP		P1 (3) P6 (1) P7 (2) P10 (2)
H	Enjuagar el filtro de microfibras de vidrio obtenido con acetato de etilo para eliminar los residuos restantes de aceite	Físico y químico	0	Filtro de microfibras de vidrio con los MPI extraídos con algunos residuos restantes de aceite y 8 mL de	Filtro de microfibras de vidrio con los MPI extraídos libre de residuos de aceite	Acetato de etilo		Ecotoxicidad aguda y crónica en organism	Líquido inflamable (-4 °C	Riesgo de ignición. Los vapores pueden	Fácilmente biodegradable No	NP	P1 (2) P5 (2) P7 (2) P10 (3) P12 (2)

acetato de etilo



os acuáticos, a 101,3 kPa) puede ser peligrosa para el ambiente si su exposición es abundante. formar una mezcla explosiva con aire en el ambiente persiste.

Peróxido de hidrógeno

I Sumergir el filtro de microfibra de vidrio en peróxido de hidrógeno (H₂O₂) al 30% a 60 °C durante 24 h

Químico

500

Filtro de microfibra de vidrio con los MPI extraídos libre de residuos de aceite, 10 mL de peróxido de hidrógeno al 30%
Filtro de microfibra de vidrio con los MPI extraídos y materia orgánica removida



Nocivo para los organismos acuáticos, puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático.

NP

Líquido comburente - Agente Oxidante: Peligro de fuego en contacto con materias combustibles/orgánicas

NP

NP

P1 (2)
P2 (1)
P5 (2)
P6 (2)
P7 (1)
P10 (2)
P12 (3)

Nota: Elaboración propia. NP = No presenta, SH = Salud humana, A= Ambiente, I=Inflamabilidad, RA=Reactividad, D=Degradabilidad, RE=Renovabilidad, CE= Consumo Energético, E=Entradas y S=Salidas

La calificación de los principios por cada etapa se justifica a continuación:

Etapa A: En el primer paso, al utilizar como materia prima el suelo, este se considera un residuo inocuo al tratarse de recurso natural y renovable, por ello se considera el principio 1 y 7 con un valor de 3, además al tratarse de un proceso que se hace a temperatura ambiente se refleja en la puntuación de 3 para el principio 6.

Etapa B: Una vez tamizado, se procede a secar la muestra de 11 g de suelo a 40°C, por lo cual el principio 6 se da una calificación de 2, sin embargo, para este paso se mantiene la evaluación del principio 1 y 7 del anterior paso.

Etapa C: Para la preparación de la solución al 10% de NaCl y aceite como tercer paso, se utiliza como disolvente el agua destilada, sustancia considerada inocua para la salud humana y ambiente, lo cual indica que el principio 5 tenga un valor de 3. Por otra parte, el cloruro de sodio como residuo tras la disolución representa un riesgo moderado para la salud humana y ambiente (Roth, 2020b), por lo cual se le asigna un valor de 2 al principio 1, simultáneamente por la concentración empleada de este no se evidencia un exceso de reactivos ni formación de subproductos siendo el principio 2 de valor 3, además el agua destilada como disolvente no representa ningún riesgo para la salud y ambiente (Roth, 2022a), por lo que el principio 5 se tiene un valor de 3. El aceite de canola resulta ser inflamable a temperatura altas (Roth, 2018a), sin embargo, en esta preparación se utiliza una temperatura de 30°C, existiendo nulo riesgo ante una exposición o accidente químico, por lo cual el principio 12 tiene una apreciación de 3, al mismo tiempo el principio 6 se califica con 2 por el grado de temperatura empleado. En cuanto a renovabilidad y degradabilidad, solo el cloruro de sodio se considera no renovable y se puede degradar en productos inocuos, puntuando al principio 7 y 10 con un valor de 2.

Etapa D: Al homogeneizar la mezcla de MPI, suelo y la solución NaCl-aceite al 10%, se considera como disolvente la misma solución y considerando lo anterior, se denota una puntuación de 2 para el principio 5. Este proceso no requiere de alguna condición atmosférica específica de presión o temperatura, se realiza en condiciones ambientales, característica fundamental del principio 6 con la puntuación de 3. Por otro lado, en este proceso se continúa empleando las mismas sustancias químicas expuestas en el párrafo anterior, por ende los principios 7, 10 y 12 manejan la misma puntuación de 2,2 y 3 respectivamente.

Etapa E: En el proceso de congelación, se manejan los mismos valores para el principio 7, 10 y 12 por las razones previamente mencionadas, empero el principio 6 se puntúa de 1, dado que el proceso de congelación se hace a -80°C una temperatura menor de 0°C, lo cual requiere un consumo energético grande de 1800 Wh.

Etapa F: Posteriormente, el proceso físico de retirar la capa de aceite de la mezcla congelada al realizarse bajo condiciones ambientales, da una puntuación para el principio 6 de 3, al mismo tiempo, que para el principio 1, puesto que una vez congelado resulta fácil separar cada capa y disponerla correctamente acorde a sus características, siendo estas el suelo y la solución NaCl, residuos inocuos para la salud humana y el ambiente. Además, se continúa manteniendo una moderación de 2 para los principios 7 y 10 por las mismas sustancias químicas empleadas durante todo el proceso.

Etapa G: Una vez separada la capa de aceite, esta se filtra por medio del sistema de bomba al vacío, el cual genera una condición de presión diferente a la atmosférica, permitiendo valorar el principio 6 con la connotación más baja de 1. El aceite de canola como residuo se considera inocuo para el ambiente y la salud humana, por lo cual se evalúa el principio 1 con calificación de 3, simultáneamente los principios 7 y 10 se puntúan con un valor de 2, debido a que existe la presencia de muestras de microplásticos, los cuales no son degradables ni renovables imposibilitando dar una connotación de 3 a estos principios a pesar del uso del aceite, que resulta renovable.

Etapa H: Para la identificación y cuantificación de los MPI extraídos, resulta necesario disolver los residuos de aceite del filtro de microfibra de vidrio por medio del lavado con acetato de etilo, disolvente orgánico cuyo uso puede conllevar a una ecotoxicidad del ambiente y peligro para la salud, no obstante por la cantidad de uso, este representa un riesgo moderado para dichos aspectos (Roth, 2020a) categorizando el principio 1 y 5 con un valor de 2. Igualmente, este reactivo químico si bien resulta ser inflamable y con riesgo de ignición (Roth, 2020a), por su concentración en el proceso, se determina como un riesgo moderado de accidente químico con una moderación de 2 para el principio 12. Por otro lado, al ser una sustancia orgánica es de fácil degradación y no persiste en el ambiente (Roth, 2020a), por lo cual la degradabilidad con el principio 10 se puntúa de 3, sin embargo, esto no implica que su renovabilidad sea completa, por lo cual el principio 7 se denota con un valor de 2.

Etapa I: Por último, para evitar cualquier tipo de interferencia en la cuantificación de los MPI extraídos, se realiza la oxidación de materia orgánica a través del uso del peróxido de hidrógeno (H_2O_2), producto químico corrosivo y nocivo para el ambiente (Roth, 2020c), pero por la cantidad que se emplea representa un riesgo moderado para la salud humana y ambiente, reflejado en la puntuación de 2 en los principios 1 y 5. Además, al emplear esta sustancia con una concentración del 30% permite dar la calificación más baja al principio 2, puesto que eso representa un exceso en el reactivo al presentar concentraciones altas en su elaboración, de igual forma, como reactivo no presenta un riesgo de accidente químico con su uso, denotando el principio 12 con un puntaje de 3.

Durante la oxidación, se manejó una temperatura de 60°C por 24 h, cuyo gasto energético y condiciones de temperatura permiten puntuar al principio 6 con un valor de 2. El peróxido de hidrógeno se considera una sustancia no degradable (Roth, 2020c), pero se podría degradar en agua y oxígeno, productos inocuos que reflejan el valor de 2 en el principio 10, por otro lado, esta sustancia no es renovable (Roth, 2020c), por lo cual se evalúa el principio 7 con el valor más bajo siendo 1.

A continuación, se presentan los promedios obtenidos de cada principio evaluado a razón de proceder con los cálculos respectivos a la estrella verde.

Tabla 21.*Puntuación de principios evaluados en cada etapa de la metodología propuesta de extracción de MPI*

Etapa	P1	P2	P5	P6	P7	P10	P12
A	3	N/A	N/A	3	3	N/A	N/A
B	3	N/A	N/A	2	3	N/A	N/A
C	2	3	3	2	2	2	3
D	N/A	2	2	3	2	2	3
E	N/A	N/A	N/A	1	2	2	3
F	3	N/A	N/A	3	2	2	N/A
G	3	N/A	N/A	1	2	2	N/A
H	2	2	2	N/A	2	3	2
I	2	2	2	2	1	2	3
Puntuación promedio	2,57	2,00	2,25	2,13	2,11	2,14	2,80

Nota: Elaboración propia. N/A= No aplica.

A partir de estos, se afirma que los principios más considerados en las etapas de la metodología son el principio 6 y 7, visto que se evaluaron prácticamente en los 9 pasos establecidos, exceptuando un paso para el principio 6. Por otro lado, los principios que tuvieron una mayor calificación como criterio de sostenibilidad resultan siendo el 1 y 12, puesto que sus promedios de 2,57 y 2,80 respectivamente son los más altos obtenidos de todos los promedios.

La tabla 22 muestra los resultados obtenidos de los cálculos pertinentes para obtener el índice de área de la estrella verde (*GSAI*) gracias a los promedio obtenidos (Tabla 21) junto con las ecuaciones 9,10,11 y 12.

Tabla 22.

Cálculo del índice de área de la estrella verde de la metodología propuesta de extracción de MPI

Número de área	Principios comprendidos	Puntuación de los principios	Área de la sección (AS)	Área estrella (GS)	Área estrella completa (Full área)	Índice de área de la estrella verde (GSAI)
A1	P1~P2	2,57~2,00	1,46			
A2	P2~P5	2,00~2,25	1,24			
A3	P5~P6	2,25~2,13	1,34			
A4	P6~P7	2,13~2,11	1,23	10,48	19,80	52,92%
A5	P7~P10	2,11~2,14	1,25			
A6	P10~P12	2,14~2,80	1,77			

Nota: Elaboración propia.

De estos, se destaca que el área de la estrella verde de la metodología planteada da 10,48 junto con un índice de la estrella verde de 52,92%, valor que se puede interpretar como el grado de cumplimiento de los criterios de sostenibilidad establecidos a partir de los principios de la química verde.

Gracias a los datos obtenidos de la tabla 21, se graficó la estrella verde (Figura 39) de la metodología propuesta de extracción de MPI en el suelo de la finca bananera, la cual tiene 7 esquinas al descartar los principios 3, 4, 8, 9 y 11, además se evidencia el cumplimiento de las etapas físicas y químicas con respecto a los principios como criterios de sostenibilidad, puesto que visualmente el área de la estrella verde cubre en gran medida todas esquinas de los principios.

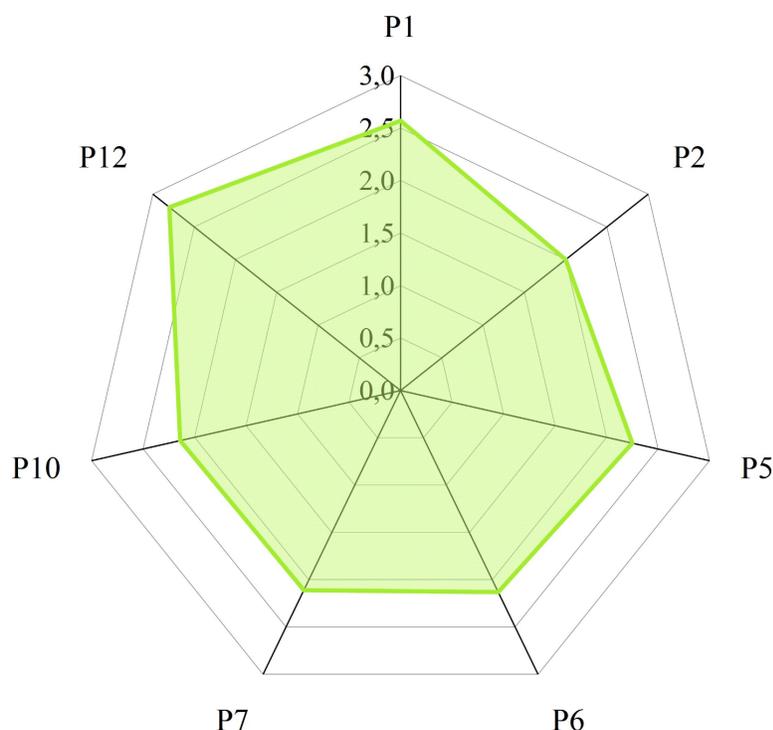


Figura 39. Estrella verde de la metodología planteada de extracción de MPI en el suelo de la Zona Bananera. Elaboración propia

9.3.5.2. Diagnóstico del proceso de la metodología Scopetani et al. (2020)

Con el propósito de equiparar el cumplimiento de sostenibilidad de la metodología propuesta, se realiza el cálculo de la estrella verde de la metodología de extracción propuesta por Scopetani et al. (2020) como referencia, cuya elección se da debido a que Kasa et al. (2022) evaluó la verdosidad de esta metodología a partir del software Analytical GREENness, sin embargo para comparar correctamente fue necesario realizar la evaluación de verdosidad bajo el mismo procedimiento de Ribeiro et al. (2010). Para esta evaluación, se consideraron igualmente los 7 principios seleccionados (Tabla 18). En este sentido, también se realizó el listado y clasificación de las sustancias químicas presentes en el desarrollo de la metodología de Scopetani et al. (2020) (Tabla 23), cada una con su respectivo puntaje acorde a las fichas de seguridad y los criterios de las tablas 5 y 6.

Tabla 23.

Puntuación de sustancias empleadas para la construcción de la estrella verde de la metodología Scopetani et al. (2020)

Reactivos	Símbolos	Salud Humana	Ambiente	Accidente Químico	Degradabilidad	Renovabilidad
Reactivos Estequiométricos						
Sulfato de hierro (II)		2	3	1	3	3
Aceite de oliva		1	2	2	1	2
Ácido protocatéuico		1	1	1	1	1
		o				
Sustancias Auxiliares						
Hexano		3	3	3	3	1
Agua destilada		1	1	1	1	1
Peróxido de hidrógeno	Xi-O	2	2	2	2	3

Nota: Elaboración propia adaptado de Ribeiro et al. (2010)

Considerando la calificación de las tablas anteriores, se determinó los valores de los principios por cada procedimiento de la metodología, siendo en un total de 7 pasos evaluados cada uno con los principios que se considere aplicable (Tabla 24). De igual manera, se sacaron los promedios de cada principio (Tabla 25) tal como se hicieron para la metodología planteada con el fin de realizar el radial de la estrella verde de Scopetani et al. (2020).

Tabla 24.

Matriz de diagnóstico de la metodología Scopetani et al. (2020)

Etapas	Carácter	CE (Wh)	E	S	Riesgo a la salud humana y ambiente		Riesgo de potenciales accidentes químicos		Degradabilidad y renovabilidad		Principios Evaluados		
					SH	A	I	RA	D	RE			
A	Agregar 10 piezas de polímeros a la submuestra de suelo	Físico	0	10 piezas de polímeros de diferentes tipos, 25 g de submuestra de suelo	Mezcla de submuestra con polímeros	NP	NP	NP	NP	NP	NP	P6 (3) P7 (2)	
B	Añadir el protocolo de Fenton para eliminar la materia orgánica a la submuestra con polímeros en la botella de vidrio dejándola en una campana extractora	Químico y físico	1800	10 ml de H ₂ O ₂ al 30%, 1 ml de FeSO ₄ *7H ₂ O de 2 mmol/l, ácido protocatéuico, 5 mL de H ₂ O y Mezcla de submuestra	Muestra de suelo con polímeros libre de materia orgánica		Sulfato de hierro (II), heptahidrato		NP	NP	NP	NP	P1 (2) P2 (1) P5 (1) P6 (2) P7 (2) P10 (2) P12 (2)
							Toxicidad aguda acuática para los organismos acuáticos						

durante 1 hora
y luego
durante la
noche en el
horno a 40 °C

a con
polímeros

Ácido protocatéquico

NP NP NP NP Si Si

Agua Ultrapura

NP NP NP NP NP Si

Peróxido de hidrógeno



Nocivo para los organismos acuáticos, puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático.



NP

Líquido comburente - Agente Oxidante : Peligro de fuego en contacto con materias combustibles/orgánicas

NP

NP

C Homogeneizar la mezcla de la submuestra de suelo con agua ultrapura y

Físico

0

100 mL Mezcla agua homogeneizada de (18,2 MΩ), todos los componentes de Oliva y

NP

Mantener el producto alejado de los

Aceite de Oliva

Combustible, pero no fácilmente

NP

NP

Si

P5 (3)
P6 (3)
P7 (2)
P10 (2)
P12 (3)

			la mezcla de submuestra con polímeros	añadidos al cilindro de politetrafluoroetileno (PTFE)	desagües y de las aguas superficiales y subterráneas.	inflamable (>300°C)							
D		Físico	1800	Mezcla homogeneizada de todos los componentes añadidos a los cilindros de politetrafluoroetileno (PTFE)	Mezcla congelada en el cilindro de politetrafluoroetileno (PTFE)	Exposición al frío extremo sin el uso de los suplementos personales necesarios	Consumo masivo de energía eléctrica por el congelador	NP	NP	NP	NP		P6 (1) P7 (2) P10 (2) P12 (3)

E	Retirar la capa de aceite congelado con los microplásticos (MPI) dentro y dejar reposar a temperatura ambiente	Físico	0	Mezcla congelada en el cilindro de politetrafluoroetileno (PTFE)	Capa de aceite congelada con los MPI dentro de esta	NP	Mantener el producto alejado de los desagües y de las aguas superficiales y subterráneas.	NP	NP	NP	NP	P1 (3) P6 (3) P7 (2) P10 (2)
F	Filtrar al vacío la capa de aceite con los microplásticos junto con un filtro de microfibras de vidrio	Físico	100	Capa de aceite con microplásticos descongelada y un filtro de microfibras de vidrio (GF/A, 90 mm de diámetro, Whatman)	Filtro de microfibras de vidrio con los MPI extraídos y residuos restantes de aceite	NP	Acumulación y contaminación controlada de microplásticos	NP	NP	NP	NP	P1 (3) P6 (1) P7 (2) P10 (2)
G	Enjuagar el filtro de microfibras de vidrio obtenido con hexano y	Físico y químico	0	Filtro de microfibras de vidrio con los MPI extraídos	Filtro de microfibras de vidrio con los MPI			Hexano				P1 (1) P5 (1) P7 (1) P10 (1) P12 (1)

agua para
eliminar los
residuos
restantes de
aceite

junto con extraídos
residuos libre de
restantes residuos
de aceite, de aceite
las
sustancias
de hexano
y agua



Peligros
o para el
medio
ambiente
acuático
- peligro
crónico

Líquido
inflamable (-22
°C a
101,3
kPa)

Sustancia
reactiva.
Riesgo
de
ignición
y los
vapores
pueden
formar
mezclas
explosivas
con el
aire

Fácilmente
biodegradable

NP

Nota: Elaboración propia. NP = No presenta, SH = Salud humana, A= Ambiente, I=Inflamabilidad, RA=Reactividad, D=Degradabilidad, RE=Renovabilidad, CE= Consumo Energético, E=Entradas y S=Salidas

La calificación de los principios por cada etapa se justifica a continuación:

Etapa A: En Scopetani et al. (2020), inicialmente agregan 10 piezas de polímeros a la submuestra de suelo al utilizar como materia prima el suelo agrícola y el compost, este se considera un residuo inocuo al tratarse de recurso natural y solo el compost renovable, por ello se califica el principio 7 con un valor de 2, además al tratarse de un proceso que se hace a temperatura ambiente se refleja en la puntuación de 3 para el principio 6.

Etapa B: A diferencia de la metodología planteada, esta realiza el proceso de oxidación de materia orgánica directamente a las muestras de suelo y compost bajo el protocolo de Fenton, para esto se requiere de 4 reactivos químicos, dentro de los cuales se encuentra el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), producto químico corrosivo y nocivo para el ambiente (Roth, 2020c), además se utiliza el sulfato de hierro (II) heptahidrato, sustancia que tras su uso deja como residuos óxidos contaminantes que resultan nocivos para el ambiente (Roth, 2018b), igualmente se emplea el agua destilada y ácido protocatéutico, los cuales no son dañinos para la salud humana ni el ambiente. Así pues, los residuos resultantes son diferentes por la diversidad de productos químicos utilizados, designando un valor de 2 al principio 1, no siendo menor por el uso de sustancias menos nocivos, mientras que para el principio 2 se asignó una moderación de 1 al emplear el H_2O_2 en concentración de 30%, lo cual también se refleja en la puntuación de 1 para el principio 5, ya que el peróxido de hidrógeno se emplea como disolvente. En términos de accidentalidad, estos productos no representan un riesgo alto de provocar accidentes químicos, por ello se estipula un valor de 2 para el principio 12, asimismo, se les asignó a los principios 7 y 10, porque no todos los reactivos son degradables ni renovables. Este proceso emplea el uso de una campana extractora y un horno para colocar la muestra con el fenton a $40^\circ C$ por toda la noche, motivo por el cual el principio 6 tiene una puntuación de 2.

Etapa C: Al homogeneizar la mezcla de MPI, suelo, agua pura y aceite de oliva en cilindros de politetrafluoroetileno (PTFE), se considera como disolvente el agua pura, sustancia inocua que denota una puntuación de 3 para el principio 5 y 12, ya que representa no representa ningún riesgo para la salud humana y ambiente, igualmente el aceite de oliva solo presenta riesgo de accidente químico a elevadas temperaturas (Roth, 2021), no obstante este proceso no requiere de alguna condición atmosférica específica de presión o temperatura, por ende se realiza en condiciones ambientales, característica fundamental del principio 6 con la puntuación de 3. Con respecto a los principios 7 y 10, se da una calificación de 2, debido a que se emplea la acumulación de microplásticos, material que no es degradable ni renovable, aunque se presentan sustancias cuya renovabilidad es de 3 como el agua y aceite de oliva.

Etapa D: En el proceso de congelación, se manejan los mismos valores para el principio 7, 10 y 12 por las razones previamente mencionadas en la etapa C, empero el principio 6 se puntúa de 1, dado que el proceso de congelación se hace a $-40^\circ C$ una temperatura menor de $0^\circ C$, lo cual requiere un consumo energético grande.

Etapa E: Posteriormente, el proceso físico de retirar la capa de aceite de la mezcla congelada (E) al realizarse bajo condiciones ambientales, da una puntuación para el principio 6 de 3, de igual forma para el principio 1, puesto que una vez congelado resulta fácil separar cada capa y disponerla correctamente acorde a sus características, siendo estas el suelo y el agua ultrapura, residuos inocuos

para la salud humana y el ambiente. Además, se continúa manteniendo una moderación de 2 para los principios 7 y 10, debido a que ni el suelo ni el agua ultrapura ni los MPI son degradables, aunque el agua sea renovable, ni el suelo ni los MPI tiene la capacidad de renovabilidad empleadas durante todo el proceso.

Etapa F: Una vez separada la capa de aceite, esta se filtra por medio del sistema de bomba al vacío, el cual genera una condición de presión diferente a la atmosférica, permitiendo valorar el principio 6 con la connotación más baja de 1. El aceite de oliva como residuo se considera inocuo para el ambiente y la salud humana, por lo cual se evalúa el principio 1 con calificación de 3, simultáneamente los principios 7 y 10 se puntúan con un valor de 2, debido a que existe la presencia de muestras de microplásticos, los cuales no son degradables ni renovables imposibilitando dar una connotación de 3 a estos principios a pesar del uso del aceite, que resulta renovable.

Etapa G: Para la identificación y cuantificación de los MPI extraídos, resulta necesario disolver los residuos de aceite del filtro de microfibra de vidrio, en este caso, se emplea el hexano como disolvente para lavar las muestras, sustancia química altamente peligrosa para la salud humana y ambiente, cuya exposición puede tener efectos crónicos y mortales, representando un riesgo alto (Roth, 2022b), permitiendo categorizar el principio 1 y 5 con un valor de 1. Igualmente, este reactivo químico resulta ser altamente inflamable y reactivo (Roth, 2022b), representando un riesgo alto de accidente químico con una moderación de 1 para el principio 12, a pesar de que no se especifique la cantidad, su uso resulta un riesgo alto. Por otro lado, al ser una sustancia orgánica es de fácil degradación y no persiste en el ambiente (Roth, 2022b), no obstante sus subproductos no resultan ser inocuos, por lo cual la degradabilidad con el principio 10 se puntúa de 1, además no resulta renovable por lo que el principio 7 se denota con un valor de 1.

A continuación, se presentan los promedios obtenidos de cada principio evaluado a razón de proceder con los cálculos respectivos a la estrella verde.

Tabla 25.

Puntuación de principios evaluados en cada etapa de la metodología Scopetani et al. (2020)

Etapa	P1	P2	P5	P6	P7	P10	P12
A	N/A	N/A	N/A	3	2	N/A	N/A
B	2	1	1	2	2	2	2
C	N/A	N/A	3	3	2	2	3
D	N/A	N/A	N/A	1	2	2	3
E	3	N/A	N/A	3	2	2	N/A

F	3	N/A	N/A	1	2	2	N/A
G	1	N/A	1	N/A	1	1	1
Puntuación promedio	2,25	1,00	1,67	2,17	1,86	1,83	2,25

Nota: Elaboración propia. N/A= No aplica.

Con respecto a estos resultados, se afirma que los principios más considerados en las etapas de la metodología de Scopetani et al. (2020) son los principios 6, 7 y 10, visto que se evaluaron prácticamente en los 7 pasos establecidos, exceptuando un paso para el principio 6 y 10. Por otro lado, los principios que tuvieron una mayor calificación como criterio de sostenibilidad resultan siendo el 1 y 12, puesto que sus promedios de 2,25 igual para cada uno son los más altos obtenidos de todos los promedios.

La tabla 26 muestra los resultados obtenidos de los cálculos pertinentes para obtener el índice de área de la estrella verde (*GSAI*) gracias a los promedio obtenidos (Tabla 25) junto con las ecuaciones 9,10,11 y 12.

Tabla 26.

Cálculo del índice de área de la estrella verde de la metodología Scopetani et al. (2020)

Número de área	Principios comprendidos	Puntuación de los principios	Área de la sección (<i>AS</i>)	Área estrella (<i>GS</i>)	Área estrella completa (<i>Full área</i>)	Índice de área de la estrella verde (<i>GSAI</i>)
A1	P1~P2	2,25~1,00	0,44			
A2	P2~P5	1,00~1,67	0,24			
A3	P5~P6	1,67~2,17	0,92			
A4	P6~P7	2,17~1,86	1,07	6,06	19,80	30,61%
A5	P7~P10	1,86~1,83	0,85			
A6	P10~P12	1,83~2,25	1,10			

Nota: Elaboración propia.

De acuerdo con lo anterior, se destaca que el área de la estrella verde de la metodología de Scopetani et al. (2020) da 6,06 junto con un índice de la estrella verde de 30,61%, valor que se puede interpretar como el grado de cumplimiento de los criterios de sostenibilidad establecidos a partir de los principios de la química verde, siendo menor con respecto al obtenido por la metodología planteada.

Gracias a los datos obtenidos de la tabla 25, se graficó la estrella verde (Figura 40) de la metodología de Scopetani et al. (2020), la cual tiene igualmente 7 esquinas al descartar los principios 3, 4, 8, 9 y 11, además se evidencia el cumplimiento de las etapas físicas y químicas con respecto a los principios como criterios de sostenibilidad, puesto que visualmente el área de la estrella verde cubre en gran medida todas esquinas de los principios

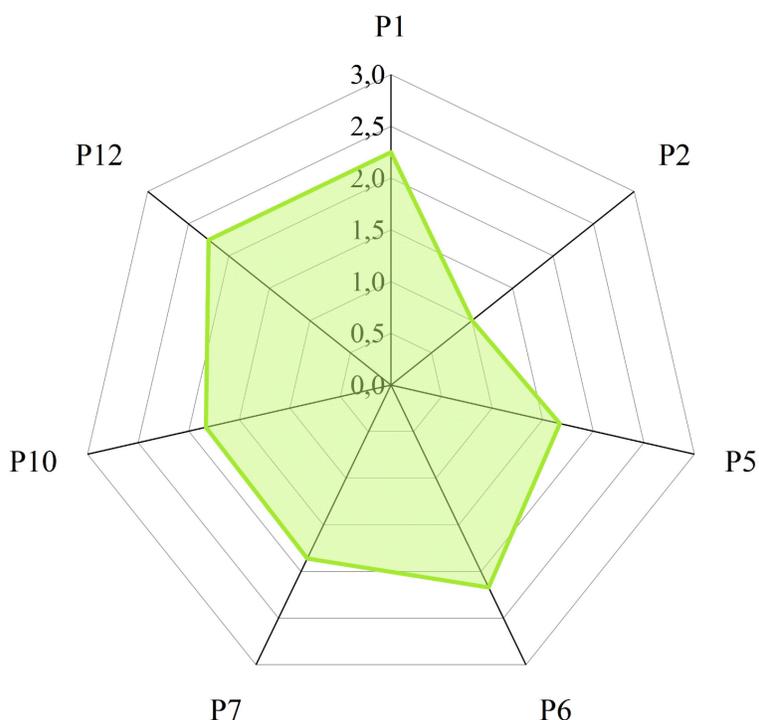


Figura 40. Estrella verde de la metodología de Scopetani et al. (2020). Elaboración propia

9.3.6. Discusión de resultados

De acuerdo con los resultados obtenidos de los objetivos 1 y 2, fue posible entablar una correlación entre las variables pertinentes al definir la metodología de extracción, debido a que el procedimiento se enfocó en la recuperación del polietileno de baja densidad (PEBD) de las bolsas plásticas azules que utilizan durante el cultivo de banano. Además, esto permitió conocer la densidad del polímero a extraer, siendo en este caso de 0,952–0,965 g/cm³ para PEBD, porque dependiendo del tipo del polímero es más fácil determinar la solución saturada a emplear en la separación por densidad, donde para este caso resultó siendo el cloruro de sodio, puesto que como lo afirman Monteiro y Da Costa (2022) la solución salina NaCl ($\rho=1,2 \text{ g/m}^3$) es capaz de aislar plásticos de baja densidad como PE,

PP y PS, siendo óptimo para este caso de estudio pues las bolsas, tiras y pita plásticas empleadas en la actividad agrícola resultaron siendo de polietileno (PE).

Adicionalmente, según Praveena et al. (2022) ha determinado que aproximadamente el 94% de los estudios han aplicado métodos de separación por diferencia de densidad para recuperar los microplásticos de las muestras de suelo, donde por recomendación de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica se ha usado la solución NaCl para aislar el MPI, debido a su bajo costo, fácil accesibilidad y bajo peligro químico (Monteiro y Da Costa, 2022). Por este motivo, su impacto ambiental es mínimo, favoreciendo la metodología propuesta en el presente trabajo al incluirlo como sustancia química para la evaluación de la estrella verde.

Por otra parte, el análisis del suelo resulta ser importante para la determinación de la relación matriz suelo-MPI, puesto que conocer el tipo del suelo y sus componentes permite reconocer aquellos que interfieren en el análisis de microplásticos (Thomas et al., 2020), de los cuales se ha evidenciado que la materia orgánica afecta en gran medida la recuperación de MPI, debido a que estos suelen adherirse a las fracciones orgánicas de la matriz sólida (Praveena et al., 2022).

Para este caso al tener un valor de 0,41% de MO, refleja que el suelo presenta un bajo contenido de materia orgánica, por lo cual no dificulta el proceso de extracción, pero según Scopetani et al. (2020) no debe ser una excepción implementar la etapa de eliminación de contenido orgánico cuando se trata de un suelo arenoso, de modo que en el diseño metodológico propuesto se considera pertinente realizar la etapa después de la separación de densidad, visto que al no presentar un alto contenido de MO implica que no se requiere una cantidad significativa del agente oxidante en el proceso (Lee et al., 2023), lo cual permite mejorar la evaluación de la química verde de la metodología propuesta en el presente trabajo.

El tratamiento de oxidación de la materia orgánica permite garantizar el éxito de la metodología de extracción, donde los agentes oxidantes comúnmente utilizados son el reactivo de Fenton y el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), dado su alta eficiencia en eliminación de contenido orgánico y no genera cambios significativos en los MPI (Thomas et al., 2020). De esta manera, la elección del tipo de reactivo a utilizar en esta etapa fue fundamental en la evaluación de la estrella verde, reflejándose en la puntuación del principio 2 y 5 de cada procedimiento, puesto que la metodología de Scopetani et al. (2020) tuvo menor área entre estos principios (A2) con un valor de 0,24 al contrario del diseño metodológico propuesto, cuya área (A2) fue de 1,24, lo cual sugiere que resulta significativamente mejor el uso del peróxido de hidrógeno (30% H_2O_2) en vez del reactivo de Fenton permitiendo así reducir los riesgos para la salud humana y el ambiente con la metodología propuesta.

Por otro lado, la implementación de la capacidad de hidrofobicidad del MPI se da gracias a la interacción oleófila entre los ácidos grasos del aceite y la cadena polimérica de las muestras de microplásticos (Scopetani et al., 2020), lo cual permitió la adhesión de estas muestras al aceite de canola sumado por la diferencia de densidad entre estos compuestos, dado que los MPI son más denso que el aceite de $0,9 \text{ g/cm}^3$ utilizado durante el procedimiento del diseño experimental.

Durante los ensayos experimentales, se evidenció una variación entre los datos obtenidos considerando dos escenarios diferentes, donde la situación sin simulación de degradación por radiación UV tuvo una eficiencia de recuperación del $67\% \pm 11$ por método de conteo y $77\% \pm 14$ por cuantificación de masa, mientras que simulando la exposición a radiación ultravioleta estipulado por

Uribe (2020) y abrasión mecánica del suelo para evaluar la influencia del deterioro de las muestras microplásticas, dio como resultado una tasa de recuperación del $56\% \pm 7$ por conteo y $73\% \pm 11$ por determinación de masa. A partir de esto, se logró observar que la eficiencia de extracción no tuvo cambios significativos comparando ambas situaciones, sin embargo, la variación de los datos se debe a la degradación de las muestras de MPI, implicando que la extracción debe considerar el tamaño del microplástico al igual que su forma, puesto que como lo afirma Qiu et al. (2022), el deterioro de los residuos plásticos mayormente se encuentran en el suelo como fragmento tras la degradación por abrasión mecánica y radiación ultravioleta.

Por otro lado, el tamaño del microplástico resultó un factor importante en la eficiencia de extracción de microplástico, debido a que como lo confirma Praveena et al. (2022), la mayoría de estudios realizados de microplásticos en el suelo que utilizaron muestras de tamaño entre 200 y 5 mm obtuvieron una mayor tasa de recuperación, tal como se evidencia con los resultados obtenidos de los ensayos experimentales.

Adicionalmente, como parte de la investigación referente a microplásticos en el suelo resultó necesario considerar la forma del MPI, dado que según Lozano et al. (2021b) se ha comprobado que la forma de los microplásticos influye en diversas propiedades del suelo. Por tal motivo, en el presente trabajo se contemplaron dos formas: Triángulo y cuadrado, donde se evidenció unas tasas de recuperación mayores de MPI cuadradas que triangulares (Figura 36 y 38), puesto que la eficiencia de extracción por conteo para las formas cuadradas varió entre $60\% \pm 15$ - $73\% \pm 7$ por conteo y por cuantificación de masa en un intervalo de $75\% \pm 6$ - $79\% \pm 14$, mientras que las formas triangulares obtuvieron tasas para conteo de $53\% \pm 7$ - $55\% \pm 15$ y para determinación por masa de $66\% \pm 25$ - $66\% \pm 6$, comprobando la importancia de la forma de MPI en el desarrollo de las metodologías de extracción.

Durante el diseño metodológico, se determinó la incidencia del método de cuantificación por dos métodos, inicialmente por conteo visual de MPI extraídos comúnmente utilizado en los diversos estudios, pero a su vez se consideró la cuantificación por masa, puesto que según Thomas et al. (2020) ha argumentado que cuantificar la contaminación microplástica en términos de masa resulta mayormente comparable con respecto al conteo. Esto se demuestra con los datos obtenidos de los ensayos experimentales, visto que se obtuvo una tasa de recuperación entre $73\% \pm 11$ - $77\% \pm 14$ por cuantificación por masa mientras que por conteo se alcanzó una eficiencia entre $56\% \pm 7$ - $67\% \pm 11$.

La incertidumbre evaluada por la prueba T-student permite reforzar la confiabilidad de los datos obtenidos, puesto que “el conocimiento de la incertidumbre implica un aumento de la confianza en la validez del resultado de una medición” (Ellison y Williams, 2012), por lo cual, se puede aseverar que los valores resultantes de los ensayos experimentales le otorga veracidad a la metodología planteada en cuanto a la eficiencia de extracción de MPI. Adicionalmente, acorde a Praveena et al. (2022), las tasas de recuperación de los diversos estudios asociados a la extracción de MPI oscilan entre el 75,4% y el 112%, de este modo los rangos de eficiencia obtenidos en el presente trabajo se encuentran dentro de un rango aceptable a través del procedimiento seleccionado.

No obstante, la dispersión de los datos obtenidos se debe a los errores aleatorios sucedidos durante los ensayos experimentales en el laboratorio, los cuales se dan al momento de hacer repeticiones de una medida bajo las mismas condiciones, cuyas lecturas resultan diversas (Guerrero y Díaz, 2007). Para este caso, se asume que errores aleatorios que influyen en la ejecución de la metodología, puede ser que la mezcla no se haya congelado completamente, la dispersión de los MPI al momento de

reiterar la capa de aceite, la disposición de MPI al momento de cuantificar por masa generando variación en la toma de datos, la interrupción en los proceso por factores externos.

Por otra parte, en cuanto al cálculo de la estrella verde, se comparó las áreas de las estrellas verdes obtenidas (Figura 41), donde se aprecia que el diseño metodológico ocupa mayor área con respecto a la de Scopetani et al. (2020), sin embargo por la dificultad de evaluar el verdor de las metodologías visualmente Ribeiro et al. (2010) propone la determinación de un índice del área de estrella verde (GSAI), el cual para la metodología propuesta fue de 52,92% resaltando mayor que la metodología de Scopetani et al. (2020), la cual tuvo un índice de 30,61%. Esto refleja que el diseño experimental cumple mayormente con los principios de la química verde, considerados como criterios que brindan aspectos de sostenibilidad a las metodologías evaluadas.

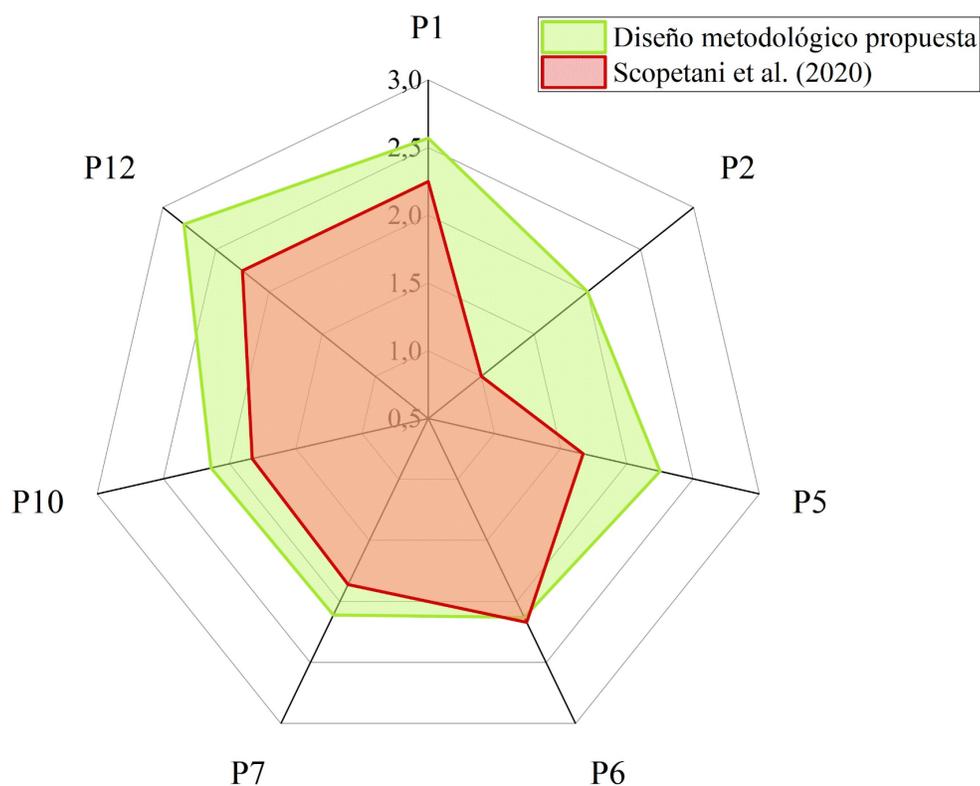


Figura 41. Comparación de las estrellas verdes de la metodología de Scopetani et al. (2020) y del diseño metodológico propuesto. Elaboración propia

La diferencia de los resultados de la estrella verde se ven reflejados por el cambio del reactivo para la oxidación de materia orgánica, pasando de Fenton a peróxido de hidrógeno, no obstante, el mayor cambio representativo fue optar por el acetato de etilo en vez del hexano para la etapa de enjuague del filtro de microfibra con el fin de eliminar los residuos de aceite restante que afecten la determinación de cuantificación por masa. Esto se evidenció principalmente en el cambio del área del principio 1 a 2 (A1) y principio 2 a 5 (A2) teniendo un mayor peso la evaluación de dichos aspectos, puesto que se asocian a los residuos de los procesos químicos y los efectos de las sustancias químicas que presentan ante la salud humana y ambiente.

10. Conclusiones

A modo de conclusión, las prácticas inadecuadas de gestión de los residuos evidenciadas durante la visita técnica dentro de la finca bananera “Vega Caballero” propician la degradación y acumulación de microplásticos derivados del polietileno (PE) de las bolsas, tiras y pitas plásticas empleadas durante todo el proceso agrícola del banano.

Por otra parte, al analizar el suelo de la finca bananera “Vega Caballero”, se evidenció la presencia de microplásticos gracias a la guía Shaw Institute (2019) principalmente en forma de filamentos de color rojo, azul y transparente, además con base en la guía fue posible cuantificar visualmente los MPI y estableciendo que existe una relación entre la cantidad del suelo y la presencia de este contaminante emergente. Asimismo, al observar las muestras plásticas bajo microscopio, se identificó que los MPI encontrados se derivan de la degradación de los productos plásticos por su similitud en la forma de composición morfológica.

De igual forma, se analizó que las propiedades mayormente afectadas por la presencia de microplásticos evidenciados en el suelo de la finca bananera “Vega Caballero” fueron la densidad aparente ($1,05 \text{ g/cm}^3$) y consecutivamente, la porosidad del suelo (64%). Además, la estabilidad baja de agregados (DPM 0,29 y EA 1,36%) del suelo arenoso analizado propicia la migración de MPI en la matriz sólida, lo cual implica una mayor ocupación de este contaminante en los poros del suelo, afectando directamente en la retención de humedad (12,26%) y aireación.

Por otro lado, gracias a la revisión sistemática y el análisis de multicriterio, se establecieron las etapas físicas y químicas de la metodología de extracción de microplásticos en el suelo de la finca bananera “Vega Caballero”, cuyo proceso consiste inicialmente en la preparación de la muestra de suelo con un tamiz para secarlo a 40°C por 24 horas, posteriormente, se procede a realizar la solución salina NaCl y aceite de canola a una concentración del 10% (v/v), luego con las muestras microplásticas de 5 mm fabricadas junto con la solución y el suelo se homogeniza con agitación la mezcla en una jeringa plástica modificada con sistema de pistón para proceder a congelarlo a -80°C por hora y media. Una vez esto, se activa de sistema de pistón para retirar la capa de aceite con los MPI extraídos para filtrar bajo el sistema de bomba al vacío con un filtro de microfibras de vidrio de $1,2 \mu\text{m}$, continuamente se lava el filtro con acetato de etilo para remover residuos restantes del aceite y, por último, realizar la oxidación de materia orgánica al filtro con el fin de eliminar impurezas del suelo.

Respecto a los ensayos experimentales, se obtuvo una eficiencia de extracción entre $56\% \pm 7$ - $67\% \pm 11$ por el método del conteo, mientras que por cuantificación de masa se tuvo una tasa de recuperación entre $73\% \pm 11$ - $77\% \pm 14$, lo cual sugiere que la determinación de extracción de microplásticos sea en términos de masa en vez de conteo visual. Por otro lado, las condiciones experimentales consideradas como la radiación UV y abrasión mecánica generaron un cambio no significativo en la extracción de MPI, puesto que se logró una recuperación de $56\% \pm 7$ por conteo y $73\% \pm 11$ por masa siendo menor a las tasas obtenidas sin considerar la simulación, las cuales fueron de $67\% \pm 11$ por conteo y $77\% \pm 14$ por masa.

Así como, se comprobó la incidencia de la forma del microplástico en la extracción con la metodología propuesta, puesto que los ensayos experimentales demostraron obtener mayores tasas de

recuperación para las muestras microplásticas con forma cuadrada con eficiencia de $60\% \pm 15$ - $73\% \pm 7$ por conteo y $75\% \pm 6$ - $79\% \pm 14$ por cuantificación de masa, en vez de las triangulares con una eficiencia de $53\% \pm 7$ - $55\% \pm 15$ por conteo y $66\% \pm 25$ - $66\% \pm 6$ por determinación de masa.

El diseño metodológico propuesta de extracción de microplásticos en el suelo obtuvo un índice de estrella verde de 52,92%, cumpliendo mayormente con las consideraciones de sostenibilidad establecidas a partir de los principios de la química verde en comparación con la metodología de Scopetani et al. (2020) con un valor de 30,61%.

Por último, se logró diseñar la metodología para la extracción de microplásticos que cumplieran con los principios de la química verde para demostrar consideraciones de sostenibilidad en el proceso, permitiendo su veracidad para ser implementado a futuro en los suelos tratados de la Zona Bananera, Magdalena.

11. Recomendaciones

Para futuros estudios, se recomienda profundizar en la evaluación de extracción de MPI considerando su forma y tipo de polímero junto con el análisis correcto del suelo a tratar. Con respecto al montaje experimental, se recomienda disponer de un aparato que genere cambios de temperatura para evaluar la influencia en la degradación del MPI por la temperatura junto con la abrasión mecánica y radiación UV, con el fin de evaluar otros factores externos que influyan en la extracción.

Por otro lado, el tamaño de la muestra de MPI puede ser un factor importante para la extracción, por lo cual en futuros estudios considerar diversos tamaños con el fin de establecer su incidencia en la eficacia de la metodología. Además, en futuros estudios, para las determinaciones de sostenibilidad resulta funcional contemplar la modificación de la temperatura de congelación dentro de la metodología propuesta, donde exista la variación y evaluación a que temperatura resulta óptimo la congelación de la capa de aceite y a su vez, no se consuma una cantidad excesiva de energía eléctrica.

12. Referencias Bibliográficas

- Ahluwalia, V. (2012). *Green chemistry: a textbook*. Alpha Science International.
- Ainali, N. M., Kalaronis, D., Kontogiannis, A., Evgenidou, E., Kyzas, G. Z., Yang, X., ... Lambropoulou, D. A. (2021, November 10). Microplastics in the environment: Sampling, pretreatment, analysis and occurrence based on current and newly-exploited chromatographic approaches. *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148725>
- Álvarez-Lopezello, J., y Chávez-García, E. (2022). Microplásticos en el Antropoceno: contaminación y efectos en el suelo. *Centro*, 14, 212-217.
- Alcaldía Municipal Zona Bananera. (2017). Intervención y solución del problema relacionado con el derecho al agua potable municipio de Zona Bananera Magdalena. Recuperado de <https://zonabananera-magdalena.gov.co/Transparencia/BancoDocumentos/Estudios%20previos.pdf>
- Arango Vargas, A. M. (2015). Efectos ambientales ocasionados por la técnica del embolsado de plátano en la producción agrícola del municipio de Ulloa–Valle.
- Bank, M. S. (Ed.). (2021). *Microplastic in the environment : Pattern and process*. Springer International Publishing AG.
- Bencardino, C. M. (2019). *Estadística básica aplicada*. Ecoe ediciones. Quinta edición
- Berumen, S. A., & Llamazares Redondo, F. (2007). La utilidad de los métodos de decisión multicriterio (como el AHP) en un entorno de competitividad creciente. *Cuadernos de administración*, 20(34), 65-87.
- Biviano Pérez, C., González Pérez, M., Dorantes Bautista, G., Aguirre García, M., Montes Damián, F., & García Manrique, N. (2023). Análisis del ácido protocatéuico (componente químico del maracuyá) como antioxidante de aminoácidos; Usando química cuántica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(2), 9643–9656. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.6059
- Blair Crawford, C., & Quinn, B. (2017). *Microplastic Pollutants*. Elsevier Science. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-04315-5>
- Bruand, A., Hartmann, C., & Lesturgez, G. (2005). Physical properties of tropical sandy soils: A large range of behaviours. In *Management of Tropical Sandy Soils for Sustainable Agriculture. A holistic approach for sustainable development of problem soils in the tropics.*
- Cabeza Meza, O. (2014). Agua y conflictos en la Zona Bananera del Caribe colombiano en la primera mitad del siglo XX.
- Camargo Caicedo, Y., Tovar Bernal, F., & Álvarez Pineda, E. (2020). RESIDUOS DE PLAGUICIDAS EN CULTIVOS DEL MUNICIPIO ZONA BANANERA, DEPARTAMENTO DEL

MAGDALENA, COLOMBIA. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 145–153(37), 1-9. <https://doi.org/10.20937/rica.53725>

Cascant-Vilaplana, M. M., Breil, C., Garrigues, S., De La Guàrdia, M., Fabiano-Tixier, A. S., & Chémat, F. (2017). A Green Analytical Chemistry Approach for lipid extraction: Computation methods in the selection of green solvents as alternative to hexane. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 409(14), 3527-3539. <https://doi.org/10.1007/s00216-017-0323-9>

Chen, Y., Wen, D., Pei, J., Fei, Y., Ouyang, D., Zhang, H., & Luo, Y. (2020). Identification and quantification of microplastics using Fourier-transform infrared spectroscopy: Current status and future prospects. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 18, 14–19. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2020.05.004>

Da Costa, J. P., Nunes, A. R., Santos, P. S. M., Girão, A. v., Duarte, A. C., y Rocha-Santos, T. (2018). Degradation of polyethylene microplastics in seawater: Insights into the environmental degradation of polymers. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 53(9), 866–875. <https://doi.org/10.1080/10934529.2018.1455381>

Doble, M., Rollins, K., & Kumar, A. (2007). *Green chemistry and engineering*. Elsevier Science & Technology.

Dolar, A., Selonen, S., van Gestel, C. A., Perc, V., Drobne, D., & Kokalj, A. J. (2021). Microplastics, chlorpyrifos and their mixtures modulate immune processes in the terrestrial crustacean *Porcellio scaber*. *Science of the Total Environment*, 772, 144900 Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144900>

Duan, J., Han, J., Zhou, H., Lau, Y. L., An, W., Wei, P., Cheung, S. G., Yang, Y., & Tam, N. F. (2020). Development of a digestion method for determining microplastic pollution in vegetal-rich clayey mangrove sediments. *Science of The Total Environment*, 707, 136030. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136030>

Dutta, A. (2017). Fourier Transform Infrared Spectroscopy. In *Spectroscopic Methods for Nanomaterials Characterization* (pp. 73–93). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-46140-5.00004-2>

Eerkes, D., Thompson, R. C., y Aldridge, D. C. (2015). Microplastics in freshwater systems: A review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs. *Water Research*, 75, 63–82. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.012>

Ellison, S. L. R., & Williams, A. (2012). Cuantificación de la incertidumbre en medidas analíticas. *Eurachem/Citac*, 3, 133.

Fan, W., Qiu, C., Qu, Q., Hu, X., Mu, L., Gao, Z., & Tang, X. (2023). Sources and identification of microplastics in soils. *Soil & Environmental Health*, 1(2), 100019. <https://doi.org/10.1016/j.seh.2023.100019>

- Gamez, M. J. (2022, 24 mayo). Objetivos y metas de desarrollo sostenible. Desarrollo Sostenible. Recuperado 6 de octubre de 2022, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Garcés-Ordóñez, O., Castillo-Olaya, V. A., Granados-Briceño, A. F., Blandón García, L. M., & Espinosa Díaz, L. F. (2019). Marine litter and microplastic pollution on mangrove soils of the ciénaga grande de santa marta, colombian caribbean. *Marine Pollution Bulletin*, 145, 455-462. doi:<https://doi-org.ezproxy.unbosque.edu.co/10.1016/j.marpolbul.2019.06.058>
- Garcés-Ordóñez, O., Saldarriaga-Vélez, J. F., Espinosa-Díaz, L. F., Patiño, A. D., Cusba, J., Canals, M., Mejía-Esquivia, K., Fragozo-Velásquez, L., Sáenz-Arias, S., Córdoba-Meza, T., & Thiel, M. (2022). Microplastic pollution in water, sediments and commercial fish species from Ciénaga Grande de Santa Marta lagoon complex, Colombian Caribbean. *Science of The Total Environment*, 829, 154643. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154643>
- Gazal, A. A., & Gheewala, S. H. (2020). Plastics, microplastics and other polymer materials-A threat to the environment. By *Journal of Sustainable Energy and Environment Journal of Sustainable Energy & Environment*, 11, 113–122.
- Gómez Giraldo, J. C. (2013). *MANUAL DE PRÁCTICAS DE CAMPO Y DEL LABORATORIO DE SUELOS* (M. R. Osorio Canal, Ed.; pp. 1–103).
- Guo, Z., Li, P., Yang, X., Wang, Z., Lu, B., Chen, W., Wu, Y., Li, G., Zhao, Z., Liu, G., Ritsema, C., Geissen, V., & Xue, S. (2022). Soil texture is an important factor determining how microplastics affect soil hydraulic characteristics. *Environment International*, 165, 107293. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107293>
- Guerrero, A., & Díaz, G. (2007). *Introducción de Errores en la Medición*. ITM.
- He, D., Zhang, X., & Hu, J. (2021). Methods for separating microplastics from complex solid matrices: Comparative analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 409, 124640. doi:<https://doi-org.ezproxy.unbosque.edu.co/10.1016/j.jhazmat.2020.12464>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2020). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Mcgraw-hill.
- Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R. C., & Thiel, M. (2012). Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification. *Environmental science & technology*, 46(6), 3060-3075. Recuperado de <https://doi.org/10.1021/es2031505>.
- Huang, Y., Liu, Q., Jia, W., Yan, C., & Wang, J. (2020). Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment. *Environmental Pollution*, 260, 114096. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114096>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2017). *Recomendaciones para la toma de muestras para análisis del laboratorio nacional de suelos*.

- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2015). SUELOS Y TIERRAS DE COLOMBIA. Subdirección de agrología (Vol. 2).
- Investiga CDT. (2023, 25 marzo). Espectrómetro infrarrojo por transformada de Fourier - innvestiga CDT. Innvestiga CDT - Centro de Desarrollo Tecnológico - Universidad Nacional de Colombia. <https://innvestigacdt.org/ftir-infrarrojo/>
- Jia, W., Karapetrova, A., Zhang, M., Xu, L., Li, K., Huang, M., Wang, J., & Huang, Y. (2022). Automated identification and quantification of invisible microplastics in agricultural soils. *Science of The Total Environment*, 844(June), 156853. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156853>
- José, A., Acosta, M., Riveros, E. A., Humberto, C., Walteros, A., & Romero, A. R. (2013). SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA MUNICIPAL MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL.
- Kasa, V. P., Thomas, A. P., Bordoloi, S., De Bhowmick, G., Dubey, B. K., & Sarmah, A. K. (2022). Microplastics in soil: Current status and evaluation of the greenness of various analytical methods of identification. *Green Analytical Chemistry*, 3, 100038. <https://doi.org/10.1016/j.greeac.2022.100038>
- Koelmans, A. A., Bakir, A., Burton, G. A., y Janssen, C. R. (2016). Microplastic as a Vector for Chemicals in the Aquatic Environment: Critical Review and Model-Supported Reinterpretation of Empirical Studies. *Environmental Science y Technology*, 50(7), 3315–3326. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b06069>
- Kozłowska, J. (2022). Methods of multi-criteria analysis in technology selection and technology assessment: a systematic literature review. *Engineering Management in Production and Services*, 14(2), 116–137. <https://doi.org/10.2478/emj-2022-0021>
- Kononov, A., Hishida, M., Suzuki, K., & Harada, N. (2022). Microplastic extraction from agricultural soils using canola oil and unsaturated sodium chloride solution and evaluation by incineration method. *Soil Systems*, 6(2) doi:10.3390/soilsystems6020054
- Kurtz, S. M. (2015). UHMWPE Biomaterials Handbook: Ultra High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement and Medical Devices. William Andrew.
- Lee, H., Kim, S., Sin, A., Kim, G., Khan, S., Nadagouda, M. N., ... Han, C. (2023, May 1). Pretreatment methods for monitoring microplastics in soil and freshwater sediment samples: A comprehensive review. *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161718>
- Li, J., Liu, H., y Paul Chen, J. (2018). Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection. *Water Research*, 137, 362–374. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.056>

- Lince-Salazar, L. A., Castro, A. F., & Castaño, W. A. (2020). Estabilidad de agregados de suelos de la zona cafetera colombiana. *Revista Cenicafé*, 71(2), 73–91. <https://doi.org/10.38141/10778/71206>
- Liu, M., Lu, S., Song, Y., Lei, L., Hu, J., Lv, W., Zhou, W., Cao, C., Shi, H., Yang, X., & He, D. (2018). Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, China. *Environmental Pollution*, 242, 855-862. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.051>
- Lozano, Y. M., Lehnert, T., Linck, L. T., Lehmann, A., & Rillig, M. C. (2021b). Microplastic shape, polymer type, and concentration affect soil properties and plant biomass. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.616645>
- Ma, J., Xu, M., Wu, J., Yang, G., Zhang, X., Song, C., Long, L., Chen, C., Xu, C., & Wang, Y. (2023). Effects of variable-sized polyethylene microplastics on soil chemical properties and functions and microbial communities in purple soil. *Science of The Total Environment*, 868, 161642. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161642>
- Mengist, W., Soromessa, T., & Legese, G. (2020). Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research. *MethodsX*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.100777>
- MINAGRICULTURA. (2017). Principales cultivos por área sembrada en 2017. Magdalena. Recuperado de: <http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11438/8559/1/Magdalena.pdf>
- Monteiro, S. S., & Da Costa, J. P. (2022). Methods for the extraction of microplastics in complex solid, water and biota samples. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 33, e00151. <https://doi.org/10.1016/j.teac.2021.e00151>
- Ortega Parejo, E. A. (2020). PLAN DE DESARROLLO TERRITORIAL ZONA BANANERA (2020-2023) “Unidos somos más, liderando el progreso.”
- Peña, P. P. (2023). Espectroscopía de infrarrojo: Análisis e interpretación de compuestos. Universidad Juárez del Estado de Durango.
- Phan, S., Padilla-Gamiño, J. L., & Luscombe, C. K. (2022). The effect of weathering environments on microplastic chemical identification with Raman and IR spectroscopy: Part I. polyethylene and polypropylene. *Polymer Testing*, 116, 107752. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107752>
- Praveena, S. M., Aris, A. Z., & Singh, V. (2022). Quality assessment for methodological aspects of microplastics analysis in soil. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 34, e00159. <https://doi.org/10.1016/j.teac.2022.e00159>
- Priya, A. K., Jalil, A. A., Dutta, K., Rajendran, S., Vasseghian, Y., Qin, J., y Soto-Moscoso, M. (2022). Microplastics in the environment: Recent developments in characteristic, occurrence, identification and ecological risk. *Chemosphere*, 298, 134161. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134161>

- Prosenc, F., Leban, P., Šunta, U., & Kralj, M. B. (2021). Extraction and identification of a wide range of microplastic polymers in soil and compost. *Polymers*, 13(23), 4069. <https://doi.org/10.3390/polym13234069>
- Qi, Y., Ossowicki, A., Yang, X., Lwanga, E. H., Dini-Andreote, F., Geissen, V., & Garbeva, P. (2020). Effects of plastic mulch film residues on wheat rhizosphere and soil properties. *Journal of Hazardous Materials*, 387, 121711. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121711>
- Qiu, Y., Zhou, S., Zhang, C., Zhou, Y., & Qin, W. (2022). Soil Microplastic Characteristics and the Effects on soil Properties and biota: A systematic review and meta-analysis. *Environmental Pollution*, 313, 120183. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120183>
- Ramik, J. (2020). Pairwise Comparisons Method. En *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-39891-0>
- Rees, O. J. (Ed.). (2010). *Fourier transform infrared spectroscopy : Developments, techniques and applications*. Nova Science Publishers, Incorporated.
- Rezania, S., Park, J., Md Din, M., Mat Taib, S., Talaiekhozani, A., Kumar Yadav, K. y Kamyab, H. (2018). Microplastics pollution in different aquatic environments and biota: A review of recent studies. *Marine Pollution Bulletin*, 133, 191–208. <https://doi.org/doi:10.1016/j.marpolbul.2018.05.022>
- Ribeiro, M. Gabriela T.C. , Costa, Dominique A. and Machado, Adélio A. S. C.(2010) "'Green Star": a holistic Green Chemistry metric for evaluation of teaching laboratory experiments', *Green Chemistry Letters and Reviews*, 3: 2, 149 — 159 <https://doi.org/10.1080/17518251003623376>
- Rocha-Santos, T., y Duarte, A. C. (2017). Characterization and Analysis of Microplastics. En D. Barceló(Ed.), *Comprehensive Analytical Chemistry (Vol. 75)*.
- Rojo-Nieto, E., & Martínez, T. M. (2017). Basuras marinas, plásticos y microplásticos: orígenes, impactos y consecuencias de una amenaza global. *Ecologistas en acción*, 978-84-946151-9-1
- Roth, C. (2018a). Ficha de Datos de Seguridad: Aceite de canola. www.carlroth.de
- Roth, C. (2018b). Ficha de Datos de Seguridad: Sulfato de hierro (II), heptahidrato. www.carlroth.de
- Roth, C. (2020a). Ficha de Datos de Seguridad: Acetato de etilo. www.carlroth.de
- Roth, C. (2020b). Ficha de Datos de Seguridad: Cloruro de sodio. www.carlroth.de
- Roth, C. (2020c). Ficha de datos de seguridad: Hidrógeno peróxido. www.carlroth.de
- Roth, C. (2021). Ficha de Datos de Seguridad: Aceite de Oliva. www.carlroth.de
- Roth, C. (2022a). Ficha de Datos de Seguridad: Agua destilada. www.carlroth.de
- Roth, C. (2022b). Ficha de Datos de Seguridad: n-Hexano. www.carlroth.de

- Rusique-Quintero, L. L., Montoya-Rojas, G. A., & Moyano-Molano, A. L. (2022). Environmental risks due to the presence of microplastics in coastal and marine environments of the Colombian Caribbean. *Marine Pollution Bulletin*, 185, 114357. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114357>
- Secretaría de planeación. (2001). Municipio Zona Bananera. Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT). Recuperado de <http://www.zonabananeramagdalena>.
- Shaw Institute (2019). Guide to Microplastics Identification, A Comprehensive Methods Guide for Microplastics Identification and Quantification in the Laboratory. Shaw Institute, Blue Hill, ME, www.shawinstitute.org.
- Shruti, V., & Kutralam-Muniasamy, G. (2023). Blanks and Bias in Microplastic Research: Implications for future quality assurance. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 38, e00203. <https://doi.org/10.1016/j.teac.2023.e00203>
- Scopetani, C., Chelazzi, D., Mikola, J., Leiniö, V., Heikkinen, R., Cincinelli, A., & Pellinen, J. (2020). Olive oil-based method for the extraction, quantification and identification of microplastics in soil and compost samples. *Science of the Total Environment*, 733. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139338>
- Surampalli, R., Zhang, T., Kaur, S., Hedge, K., Pulicharla, R y Verma, M. (2018). Handbook of Environmental Engineering. Microplastics: an emerging threat to the environment. SOURCES , TYPES , AND APPLICATIONS OF MICROPLASTICS. McGraw-Hill Education.
- Surendran, U., Jayakumar, M., Raja, P., Gopinath, G., y Chellam, P. V. (2023). Microplastics in terrestrial ecosystem: Sources and migration in soil environment. *Chemosphere*, 318, 137946. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137946>
- Thomas, D., Schütze, B., Heinze, W. M., & Steinmetz, Z. (2020). Sample Preparation Techniques for the Analysis of Microplastics in Soil—A Review. *Sustainability*, 12(21), 9074. <https://doi.org/10.3390/su12219074>
- Thomas, S. (2014). Basic statistics. Alpha Science Internation.
- Thompson, R. C., Olsen, Y., Mitchell, R. P., Davis, A., Rowland, S. J., John, A. W. G., McGonigle, D., y Russell, A. E. (2004). Lost at Sea: Where Is All the Plastic? *Science*, 304(5672), 838–838. <https://doi.org/10.1126/science.1094559>
- Thompson, R. C., Swan, S. H., Moore, C. J., & vom Saal, F. S. (2009). Our plastic age. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1973–1976. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0054>
- Tikito, I., & Souissi, N. (2019). Meta-analysis of Systematic Literature Review Methods. *International Journal of Modern Education and Computer Science*, 11(2), 17–25. <https://doi.org/10.5815/ijmecs.2019.02.03>

- Unidad de Gestión de Riesgos Agropecuarios (2018). Ficha de inteligencia: Banano tipo exportación. UGRA. Fondo para el financiamiento del Sector Agropecuario - FINAGRO. Versión II
- Uribe, V. (2020). Estudio del proceso físico y químico de degradación del polietileno bajo condiciones simuladas de calidad del agua de la cuenca baja del río frío – Magdalena, Colombia. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12495/3850>.
- Valencia, D., & De Jesús Martínez, F. (2018). Entre banano, palma y violencias en la zona bananera de Magdalena. Estudio de caso territorial sobre las afectaciones sociales, económicas y ambientales por banano y palma en Zona Bananera (L. Carrillo, F. Giraldo, & J. Medina, Eds.). Oficina de publicaciones Cinep/PPP. www.cinep.org.co
- Van Seville, E., Wilcox, C., Lebreton, L., Maximenko, N., Hardesty, B. D., Van Franeker, J. A., & Law, K. L. (2015). A global inventory of small floating plastic debris. *Environmental Research Letters*, 10(12), 124006. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124006>
- Vert, M., Doi, Y., Hellwich, K.-H., Hess, M., Hodge, P., Kubisa, P., Rinaudo, M., & Schué, F. (2012). Terminology for biorelated polymers and applications (IUPAC Recommendations 2012). *Pure and Applied Chemistry*, 84(2), 377–410. <https://doi.org/10.1351/PAC-REC-10-12-04>
- Wang, W., Ge, J., Yu, X., & Li, H. (2020, March 15). Environmental fate and impacts of microplastics in soil ecosystems: Progress and perspective. *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134841>
- Wang, F., Wang, Q., Adams, C. A., Sun, Y., & Zhang, S. (2022). Effects of microplastics on soil Properties: Current knowledge and future Perspectives. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127531. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127531>
- Yang, H., Yumeng, Y., Yu, Y., Yinglin, H., Fu, B., & Wang, J. (2022). Distribution, sources, migration, influence and analytical methods of microplastics in soil ecosystems. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 243, 114009. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114009>
- Yuan, M., Zhang, Y., Guo, W., Chen, S., Qiu, Y., & Zhang, P. (2022). A rapid staged protocol for efficient recovery of microplastics from soil and sediment matrices based on hydrophobic separation. *Marine Pollution Bulletin*, 182, 113978. doi: <https://doi-org.ezproxy.unbosque.edu.co/10.1016/j.marpolbul.2022.113978>
- Zhang, G. S., & Liu, Y. F. (2018). The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China. *Science of The Total Environment*, 642, 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.004>
- Zhang, P., Ye, Y., Jia, Z., Wen, T., Wang, H., Qu, C., Tan, W., Xi, B., Hui, K., & Tang, J. (2023b). Specific Response of soil properties to microplastics pollution: a review. *Environmental Research*, 232, 116427. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116427>

Zhang, Y., Wu, H., Xu, L., Liu, H., & An, L. (2022). Promising indicators for monitoring microplastic pollution. *Marine Pollution Bulletin*, 182, 113952. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113952>

Zhuang, X., Zhang, Z., Wang, Y., & Li, Y. (2018). The effect of alternative solvents to N-hexane on the green extraction of Litsea Cubeba kernel oils as new oil sources. *Industrial Crops and Products*, 126, 340-346. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.10.004>

13. Anexos

Anexo A. Cuantificación visual bajo la guía de Shaw Institute (2019) de la muestra de 15 g

	Azul	Rojo	Transparente/Blanco	Negro	Verde	Multicolor	Otro color	Total por filtro
Filamento	45	13	14	19	1		5	97
Redondo								0
Angular								0
Otra forma	1			4				5
Total	46	13	14	23	1	0	5	102

Anexo B. Cuantificación visual bajo la guía de Shaw Institute (2019) de la muestra de 30 g

	Azul	Rojo	Transparente/Blanco	Negro	Verde	Multicolor	Otro color	Total por filtro
Filamento	46	17	19	22	1		8	113
Redondo								0
Angular								0
Otra forma		3	2	5				10
Total	46	20	21	27	1	0	8	123

Anexo C. Cálculos de la estrella verde del diseño metodológico propuesto

Principios	Puntaje	Ángulo
------------	---------	--------

P1	2,57	57,855708
P2	2,00	44,998884
P5	2,25	50,623744
P6	2,13	47,811314
P7	2,11	47,498822
P10	2,14	48,213090
P12	2,80	62,998438
Totales	16,00	51
Ángulo		
51		0,7853981634

$\Sigma (P_i * P_{i+1}) - 1$	
	4,14
	3,50
	3,78
	3,49
	3,52
	5,00
	6,20
Totales	29,63

Anexo D. Cálculos de la estrella verde de la metodología de Scopetani et al. (2020)

Principios	Puntaje	Ángulo
P1	2,25	62,193784
P2	1,00	27,641682
P5	1,67	46,069470
P6	2,17	59,890311
P7	1,86	51,334552
P10	1,83	50,676417
P12	2,25	62,193784
Totales	13,02	51
Ángulo		
51		0,7853981634

$$\Sigma (P_i * P_{i+1}) - 1$$

1,25

0,67

2,61

3,02

2,40

3,13

4,06

Totales	17,14
----------------	-------
