

**ANALISIS DE ESTRATEGIAS PARA EL TRATAMIENTO Y
APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS EN MUNICIPIOS DE
BOYACÁ**

DIEGO ANDRES ARTEAGA ZANGUÑA

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL
INGENIERIA AMBIENTAL
TUNJA – BOYACÀ
2025**

**ANALISIS DE ESTRATEGIAS PARA EL TRATAMIENTO Y
APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS EN MUNICIPIOS DE
BOYACÁ**

**Presentado por:
DIEGO ANDRES ARTEAGA ZANGUÑA**

**Proyecto de investigación para optar por el título de:
INGENIERO AMBIENTAL**

**Director:
MSc. ESP. ING. EDINSON FABIAN MONROY AVILA**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL
INGENIERIA AMBIENTAL
TUNJA – BOYACÁ
2025**

DEDICATORIA

Siempre, primero a Dios, por haberme dado la vida, la salud, la sabiduría y la fortaleza necesarias para culminar este proceso. Su guía ha sido mi mayor sostén en los momentos de dificultad y su luz ha iluminado cada paso de mi vida y de este camino académico.

A mis padres, por ser mi ejemplo de perseverancia y entrega. Gracias por su amor incondicional, sus consejos, sus sacrificios y por creer siempre en mí. Sin ustedes, este logro no tendría sentido.

A mi hermana Anita y a mi hermano Kevin, por ser fuentes constantes de inspiración y motivación, acompañándome con su ejemplo, cariño y apoyo incondicional.

A mi prima Natalia, por haber sido un pilar importante en los inicios de este camino en la ingeniería. Su apoyo, consejos y confianza en mí fueron fundamentales para dar los primeros pasos con seguridad y motivación.

A toda mi familia, por su apoyo constante, por sus palabras de ánimo y por acompañarme con cariño y orgullo en cada etapa de esta formación. Cada uno de ustedes ha sido parte esencial de este logro.

A mi director de tesis, el Ing. Fabian Monroy, por su orientación, compromiso y paciencia durante todo este proceso. Su experiencia, sus valiosas observaciones y su exigencia académica han sido fundamentales para el desarrollo y la calidad de este trabajo.

Y a mis amigos más cercanos de mi carrera, Laurita, Dilan, Sofia, Ximena, Paula y Daniel, con quienes compartí cinco años de mi vida, por acompañarme en este camino, por todo lo vivido, las risas, los buenos momentos, los retos superados juntos y por hacer de esta etapa un recuerdo imborrable que siempre llevaré conmigo.

A todos ellos, gracias por ser parte de este capítulo tan importante en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, a Dios por permitirme alcanzar esta meta, por ser mi fuente de inspiración, esperanza y confianza en cada paso de este camino. A Él le encomiendo este logro con humildad y gratitud.

A la Ing. Karolay Chacón, la Ing. Laura Vargas y la Ing. Ángela Mena, por su valiosa colaboración y disposición durante el proceso de gestión de las muestras, contribuyendo de manera significativa al desarrollo de este trabajo.

Al gerente de AGUAS DE ARCABUCO al Ing. German Ruiz y la Ing. Jesica por su amable disposición y colaboración en la búsqueda de información, aportando con generosidad al avance de este trabajo.

Finalmente, a la Universidad por ser la casa de formación a lo largo de este gran proceso.

“El miedo dura segundos, la vergüenza dura días, pero el arrepentimiento dura para siempre”.

“Inténtalo, si es una cosa que vale la pena, lo más probable es que te salga mal, pero, y que más da, y que más da fallar una vez, y que más da fallar dos veces, y que más da fallar cincuenta, si al final lo vas a conseguir”.

“En este mundo nadie te va a regalar nada, el único responsable de tu éxito eres tú”.

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

RESUMEN	13
ABSTRAC	14
INTRODUCCIÓN	16
1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	18
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	18
1.1.1. Pregunta de investigación.....	20
1.1.2. Delimitación del problema.....	20
1.2. JUSTIFICACIÓN	22
2. OBJETIVOS	24
2.1.1. Objetivo general.....	24
2.1.2. Objetivos específicos	24
3. ANTECEDENTES	25
Evaluación de la gestión actual de residuos orgánicos.....	29
3.1. MARCO LEGAL.....	31
4. MARCO TEÓRICO.....	33
4.1. GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS	33
4.2. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS	34
4.3. TECNOLOGÍAS DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS	35
Compostaje.....	35
Compostaje Termofílico (Rápido)	38
Vermicompostaje – (Lombricultora)	40

Digestión anaeróbica	42
Incineración.....	44
Gasificación de Biomasa	46
Pirólisis de Residuos Orgánicos	48
Hidrotermólisis	50
Reciclaje Enzimático.....	51
Biocircuitos Integrados de Energía y Fertilización (Bioeconomía Circular).....	52
 4.4. MANEJO DE RESIDUOS SOLIDOS ORGANICOS EN COLOMBIA.....	 54
4.5. ESTUDIOS PREVIOS Y EXPERIENCIAS EN LA GESTIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS	56
 5. METODOLOGÍA	 58
FASE 1: IDENTIFICAR Y ANALIZAR DATOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS DE RETROSPECTIVA Y PROSPECTIVA.....	58
FASE 2: CARACTERIZAR LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS.	60
FASE 3: DETERMINAR LAS ESTRATEGIAS DE TRATAMIENTO Y APROVECHAMIENTO.	61
MATERIALES, EQUIPOS E INSUMOS	62
VARIABLES DEPENDIENTES E INDEPENDIENTES	62
ANÁLISIS DE DATOS	63
 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	 65
6.1. RESULTADOS.	65
6.1.1 FASE 1: IDENTIFICAR Y ANALIZAR DATOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS DE RETROSPECTIVA Y PROSPECTIVA.....	65
Análisis de la generación de residuos en cada municipio.....	65
Análisis de series temporales y construcción del modelo matemático.....	76
Cálculo de la producción per cápita (PPC) ajustada con modelos de prospectiva.....	82
6.1.2. FASE 2: CARACTERIZAR LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS.	86

ANÁLISIS DE HUMEDAD.....	86
CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS.....	88
ANÁLISIS CON PISTOLA XRX.	95
6.1.3. FASE 3: ESTRATEGIAS DE TRATAMIENTO Y APROVECHAMIENTO. 101	
6.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	115
7. IMPACTO SOCIAL Y HUMANISTICO.....	123
8. CONCLUSIONES.....	126
9. RECOMENDACIONES	127
REFERENCIAS	128
ANEXOS I.....	140
ANEXOS II.....	141

LISTADO DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Tabla de la normativa colombiana.	31
Tabla 2. Parámetros para el compostaje.	37
Tabla 3. Materiales.	62
Tabla 4. resultados de los pesos en húmedo de las muestras de cada municipio.	86
Tabla 5. Resultados de los pesos en seco de las muestras de cada municipio. ...	87
Tabla 6. Porcentaje de humedad de cada municipio.	88
Tabla 7. Variabilidad de alternativas tecnológicas para el tratamiento de residuos orgánicos.	104
Tabla 8. Valoración multicriterio para tecnologías en el municipio de Arcabuco.	109
Tabla 9. Valoración multicriterio para tecnologías en el municipio de Sáchica. ...	111
Tabla 10. Valoración multicriterio para tecnologías en el municipio de El Cocuy.	112

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Pág.

Ilustración 1. Metodología.	64
----------------------------------	----

LISTADO DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Fases del proceso de compostaje.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 2. Flujo de materias primas a través del sistema de AD para producir biogás y digestato.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 3. Tecnología de conversión termoquímica. ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 4. Biotransformación mediada por enzimas de material de desecho en productos útiles.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 5. Ciclo de la producción de biocombustibles dentro de la bioeconomía circular.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 6. Proyección de la población de Arcabuco.	65
Figura 7. Proyección de la generación de residuos en Arcabuco.	66
Figura 8. Generación de residuos sólidos en el municipio de Arcabuco para el periodo de 2012 - 2024.....	67
Figura 9. Proyección de la población de El Cocuy.....	68
Figura 10. Proyección de la generación de residuos en El Cocuy.....	70
Figura 11. Generación de residuos sólidos en el municipio de Arcabuco para el periodo de 2012 - 2024.....	71
Figura 12. Proyección de la población de Sáchica.	72
Figura 13. Proyección de la generación de residuos en Sáchica.....	73
Figura 14. Generación de residuos sólidos en el municipio de Arcabuco para el periodo de 2012 - 2024.....	74
Figura 15. Generación mensual multianual de residuos sólidos de los tres municipios.....	75
Figura 16. Modelo matemático para el cálculo de la PPC - municipio de Arcabuco.	76
Figura 17. Generación de residuos en el municipio de Arcabuco (2012 - 2036). ..	77
Figura 18. Modelo matemático para el cálculo de la PPC - municipio de Sáchica.....	78
Figura 19. Generación de residuos en el municipio de Sáchica (2012 - 2036).....	79
Figura 20. Modelo matemático para el cálculo de la PPC - municipio de El Cocuy.	80
Figura 21. Generación de residuos en el municipio de El Cocuy (2012 - 2036). ...	81
Figura 22. Proyecciones de la PPC y la generación de residuos sólidos.	83
Figura 23: Proyecciones en la generación de residuos sólidos.	85
Figura 24 a, b. Análisis con pistola XRF.	95
Figura 25. Composición elemental de los residuos del municipio de Arcabuco.....	96
Figura 26. Composición elemental de los residuos del municipio de El Cocuy.	97
Figura 27. Composición elemental de los residuos del municipio de Sáchica.	98
Figura 28. Composición elemental promedio de Arcabuco, El Cocuy y Sáchica.....	99
Figura 29. Evaluación de viabilidad para distintas tecnologías de los municipios de Arcabuco, El Cocuy y Sáchica.	113
Figura 30. Contenido de carbono para los residuos del municipio de Arcabuco..	143

Figura 31. Contenido de carbono para los residuos del municipio de Arcabuco..	143
Figura 32. Contenido de oxígeno para los residuos del municipio de Arcabuco..	144
Figura 33. Contenido de nitrógeno para los residuos del municipio de Arcabuco.	144
Figura 34. Contenido de azufre para los residuos del municipio de Arcabuco. ...	144
Figura 35. Contenido de PCN para los residuos del municipio de Arcabuco.....	145
Figura 36. Contenido de haluros para los residuos del municipio de Arcabuco...	145
Figura 37. Contenido de VPB para los residuos del municipio de Arcabuco.	146
Figura 38. Contenido de HHV para los residuos del municipio de Arcabuco.....	146
Figura 39. Contenido de C:N para los residuos del municipio de Arcabuco.	147
Figura 40. Contenido de carbono para los residuos del municipio de El Cocuy. .	147
Figura 41. Contenido de hidrógeno para los residuos del municipio de El Cocuy.	148
Figura 42. Contenido de oxígeno para los residuos del municipio de El Cocuy. .	148
Figura 43. Contenido de nitrógeno para los residuos del municipio de El Cocuy.	149
Figura 44. Contenido de azufre para los residuos del municipio de El Cocuy.	149
Figura 45. Contenido de haluros para los residuos del municipio de El Cocuy. ..	149
Figura 46. Contenido de PCN para los residuos del municipio de El Cocuy.....	150
Figura 47. Contenido de HHV para los residuos del municipio de El Cocuy.....	150
Figura 48. Contenido de C:N para los residuos del municipio de El Cocuy.	151
Figura 49. Contenido de carbono para los residuos del municipio de Sáchica. ...	151
Figura 50. Contenido de nitrógeno para los residuos del municipio de Sáchica. .	152
Figura 51. Contenido de hidrógeno para los residuos del municipio de Sáchica. .	152
Figura 52. Contenido de oxígeno para los residuos del municipio de Sáchica. ...	153
Figura 53. Contenido de azufre para los residuos del municipio de Sáchica.....	153
Figura 54. Contenido de haluros totales para los residuos del municipio de Sáchica.	154
Figura 55. Contenido de PCN para los residuos del municipio de Sáchica.	154
Figura 56. Contenido de VPB para los residuos del municipio de Sáchica.....	154
Figura 57. Contenido de HHV para los residuos del municipio de Sáchica.	155
Figura 58. Contenido de C/N para los residuos del municipio de Sáchica.....	155

RESUMEN

El manejo adecuado de residuos orgánicos es un desafío importante para los municipios rurales, como Arcabuco, El Cocuy y Sáchica, donde la gestión de estos residuos es crucial para mejorar la fertilidad del suelo y fomentar la autosuficiencia energética. Este estudio tiene como objetivo evaluar la viabilidad de diversas tecnologías de tratamiento de residuos orgánicos, con el fin de identificar soluciones sostenibles que optimicen los procesos de compostaje, digestión anaeróbica, deshidratación y trituración. Para ello, se analizó la composición química de los residuos en cada municipio y se evaluaron los aspectos ambientales, económicos y técnicos de cada tecnología disponible.

La metodología empleada en este estudio incluyó un análisis de datos, proyecciones matemáticas y análisis multicriterio que permitieron evaluar la viabilidad ambiental, económica y técnica de cada opción de tratamiento. Se utilizó la espectroscopía de fluorescencia de rayos X (XRF) para analizar la composición de los residuos orgánicos, lo que facilitó la identificación de los nutrientes presentes y su potencial como bioabono. Además, se consideraron los costos de implementación, la infraestructura disponible y los posibles beneficios a largo plazo de las tecnologías estudiadas.

Los resultados indican que el compostaje es la opción más viable en todos los municipios, gracias a su bajo costo de implementación y a sus beneficios agronómicos. Sin embargo, los perfiles químicos de los residuos varían entre los municipios, destacándose Arcabuco y Sáchica por sus altos niveles de potasio, calcio y magnesio, lo que favorece la producción de abonos correctivos. Por su parte, El Cocuy, a pesar de su bajo contenido de fósforo, tiene un buen potencial para mejorar la acidez del suelo. La deshidratación y trituración, aunque costosa en términos de inversión inicial, se mostró efectiva y rápida, especialmente con el uso de energía solar, lo que reduce los tiempos de procesamiento.

En conclusión, el compostaje es la tecnología más accesible y rentable para los tres municipios, mientras que la deshidratación y trituración, aunque más costosa inicialmente, ofrece ventajas en términos de eficiencia. La implementación de biocircuitos integrados de energía y fertilización también representa una opción a largo plazo para mejorar la autosuficiencia energética y reducir la dependencia de fuentes externas. Este estudio subraya la importancia de una inversión inicial en infraestructura y capacitación para asegurar el éxito de estas tecnologías y mejorar la gestión de residuos en los municipios rurales.

Palabras clave: Estrategias, tratamiento, aprovechamiento, residuos, modelos matemáticos.

ABSTRAC

Proper organic waste management is a significant challenge for rural municipalities such as Arcabuco, El Cocuy, and Sáchica, where managing these wastes is crucial for improving soil fertility and fostering energy self-sufficiency. This study aims to assess the feasibility of various organic waste treatment technologies to identify sustainable solutions that optimize composting, anaerobic digestion, dehydration, and grinding processes. To this end, the chemical composition of the waste in each municipality was analyzed, and the environmental, economic, and technical aspects of each available technology were evaluated.

The methodology used in this study included data analysis, mathematical projections, and a multicriteria analysis, allowing the environmental, economic, and technical feasibility of each treatment option to be assessed. X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) was used to analyze the composition of organic waste, which facilitated the identification of present nutrients and their potential as biofertilizers. Additionally, the implementation costs, available infrastructure, and potential long-term benefits of the technologies studied were considered.

The results indicate that composting is the most viable option in all municipalities due to its low implementation cost and agronomic benefits. However, the chemical profiles of the waste vary among the municipalities, with Arcabuco and Sáchica standing out for their high levels of potassium, calcium, and magnesium, which favor the production of corrective fertilizers. El Cocuy, despite its low phosphorus content, has good potential to improve soil acidity. Dehydration and grinding, although costly in terms of initial investment, proved effective and fast, especially when using solar energy, which reduces processing times.

In conclusion, composting is the most accessible and cost-effective technology for the three municipalities, while dehydration and grinding, although more costly initially, offer advantages in terms of efficiency. The implementation of integrated energy and fertilization biocircuits also represents a long-term option to improve energy self-sufficiency and reduce reliance on external sources. This study highlights the importance of initial investments in infrastructure and training to ensure the success of these technologies and improve waste management in rural municipalities.

Keywords: Strategies, treatment, utilization, waste, mathematical models.

INTRODUCCIÓN

Una de las principales preocupaciones a nivel global en la actualidad es el riesgo que representa al crecimiento excesivo de la población. Actualmente en el mundo hay cerca de 8.200 millones de personas y se espera que continúe aumentando durante las próximas seis décadas, alcanzando su punto máximo hacia mediados de la década de 2080, con un estimado de 10.300 millones de habitantes (ONU, 2024). Según la ONU el crecimiento de la población está influenciado principalmente por tres factores; la tasa de fertilidad, donde el promedio mundial es de 2,3 hijos por mujer, el aumento de la longevidad, que en la actualidad está en 73,3 años y la migración internacional (Iberdrola, 2024). Por otra parte el crecimiento constante de la población genera una creciente demanda sobre los recursos naturales y pone en riesgo el equilibrio de los ecosistemas del planeta, haciendo que los impactos ambientales tengan un mayor alcance (Greenfield, 2024).

Esto se traduce en una relación desequilibrada entre población y ambiente, donde el crecimiento humano descontrolado rompe el equilibrio ecológico (Miranda, 2011). Todos los seres humanos requieren de los recursos que ofrece la naturaleza, como el agua, el aire, los alimentos y la energía, y al tener que proveer de estos a más personas habrá una mayor generación de residuos, lo que constituye un reto significativo para la gestión de la contaminación y la sostenibilidad del medio ambiente (Delance, 2024). Se estima que los residuos sólidos urbanos pasarán de 2.100 millones de toneladas en 2023 a 3.800 millones en 2050 (UNEP, 2024). Anualmente en el mundo se producen aproximadamente 2.100 millones de toneladas de desechos sólidos municipales, equivalentes a llenar a unas 822.000 piscinas olímpicas, y el 33 % de estos no se manejan de forma segura para el medio ambiente, sin ningún tipo de tratamiento adecuado (Roa, 2022).

Los países europeos tienen sistemas eficientes para el aprovechamiento de residuos orgánicos, centrados en la economía circular, el reciclaje y la valorización energética. Alemania y Suiza destacan por su infraestructura avanzada y políticas estrictas. Bélgica y los Países Bajos aplican incentivos y restricciones para fomentar la reutilización. Suecia y Dinamarca priorizan la prevención y la educación ambiental, mientras que Noruega promueve ciclos cerrados con uso intensivo de biogás e incineración (Segura et al., 2020). De la mitad de los residuos que se generan actualmente en el mundo el 50% son orgánicos. América Latina produce anualmente 200 millones de Ton/año de los cuales 100 millones de estos residuos son biodegradables(ONU, 2022), y donde principalmente estos son llevados a rellenos sanitarios para su disposición final (De Anda Trasviña et al., 2021).

En Colombia, para el año 2023, alrededor del 50% de los residuos son orgánicos, de esta cantidad, cerca de 7 millones de toneladas fueron depositadas en rellenos sanitarios, lo que generó aproximadamente el 8,1% de las emisiones de gases de efecto invernadero (Osorio Gómez, 2024). En el 2023 se generaron cerca de 11.8 millones de toneladas de residuos, de este valor se estima que alrededor del 50% son de carácter orgánico, es decir que 5.9 millones de toneladas de residuos sólidos orgánicos (Superintendencia de Servicios Públicos, 2024).

En Colombia, el compostaje es la principal técnica utilizada para el aprovechamiento de residuos orgánicos, ya que es de bajo costo mediante la cual los desechos se convierten en abono gracias a la actividad de microorganismos en ambientes con oxígeno, vinculando estos residuos a una cadena de producción primaria (Vargas-Pineda et al., 2019). También se ha empezado a aplicar la digestión anaerobia, un proceso fermentativo sin presencia de oxígeno que genera biogás, utilizado para generar energía, además, se produce un subproducto llamado digestato el cual es utilizado como fertilizante en cultivos ya que es rico en nutrientes (Granzotto et al., 2023).

Es importante mencionar que, la gestión adecuada y el aprovechamiento de los residuos sólidos son fundamentales frente al crecimiento poblacional, las dinámicas territoriales y el desarrollo de diversas actividades económicas (Valencia Echeverri, 2022). En Colombia muchos de los rellenos se gestionan de forma inadecuada debido a la falta de información, costos definidos y a la corrupción, lo que frena su desarrollo en varias regiones (Bello Parra & Martínez Castaño, 2016). Es innegable que la generación de residuos sólidos es una práctica profundamente integrada en la dinámica social, pero actualmente los rellenos se enfrentan un gran problema ya que del 40% de los rellenos en Colombia se encuentran al límite de su capacidad, puesto que de los 260 rellenos existentes 94 han superado o están por superar su vida útil, este escenario evidencia un impacto directo en la vida útil de los rellenos debido al incremento en la tasa de disposición estimada (Bedoya Jiménez, 2023).

Es por ello que teniendo en cuenta lo anterior, y que a pesar de que existen mecanismos para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos, la mayoría de estos aún siguen siendo llevados a los rellenos sanitarios, sin dárseles un aprovechamiento, esta situación se da a nivel local y regional en todo el país, es por ello que el objetivo de este trabajo consiste en Diseñar estrategias de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos en los municipios de Sáchica, El Cocuy y Arcabuco pertenecientes al departamento Boyacá.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La gestión de los residuos sólidos representa un desafío considerable para los centros urbanos. El aumento de la población, la creciente urbanización, el desarrollo poco eficiente de los sectores industrial y empresarial, las transformaciones en los hábitos de consumo, son algunos de los factores que han contribuido al incremento en la generación de residuos sólidos en ciudades (Sáez & G, 2014). El aumento en la producción y gestión de estos se ha convertido en un desafío a nivel mundial (Contreras Ortiz, 2021). Cada año en el mundo se producen más de 2.100 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos (RSU), de dicha cantidad alrededor del 50% son residuos orgánicos, es decir 1.050 millones de toneladas (Romero, 2024).

Para el 2023 en Colombia se generaron aproximadamente 11.8 millones de toneladas de residuos, de este valor se estima que alrededor del 50% son de carácter orgánico, es decir que 5.9 millones de toneladas de residuos sólidos orgánicos (SUPERSERVICIOS, 2024). En Colombia, solo se aprovecha el 49 % de los residuos y se desperdicia el 34 % de los alimentos. Este panorama evidencia la necesidad de adoptar enfoques de economía circular, que promuevan el uso eficiente de recursos (Velásquez & Pulido, 2023).

Los procesos de compostaje como biofertilizantes y acondicionadores de suelos, la producción de gas, humus, los biocombustibles son de las técnicas más utilizadas para aprovechar este tipo de residuos (Jaramillo Henao & Zapata Márquez, 2008). El compostaje se destaca como una de las prácticas más comunes en Colombia para aprovechamiento de los residuos orgánicos, debido a que esta técnica permite manejar grandes volúmenes de este tipo residuos y siendo esta la alternativas más eficiente (Penagos Vargas et al., 2011).

La inminente saturación de los rellenos sanitarios en Boyacá, junto con la ausencia de políticas públicas sólidas, el escaso compromiso político y la falta de iniciativas orientadas al fomento de tecnologías de tratamiento de residuos, podría desencadenar una crisis sanitaria en el departamento. Actualmente, no existen soluciones ni proyectos concretos que respondan a esta problemática, y la creciente limitación de espacios para la disposición final representa un riesgo inminente que ningún municipio está en capacidad para afrontar. Resulta alarmante que, a menos de siete años del colapso proyectado de los rellenos sanitarios en Boyacá, aún no

se contemple de manera seria la implementación de alternativas tecnológicas sostenibles para la gestión de residuos (Monroy Ávila, 2025).

En los municipios de El Cocuy, Arcabuco y Sáchica, la fracción orgánica representa entre el 50% y el 70% según el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos – PGIRS, del total de los residuos sólidos domiciliarios generados. A pesar de ser materiales biodegradables con un alto potencial de aprovechamiento mediante procesos como el compostaje o la biodigestión para la producción de biogás, su destino final continúa siendo, en la mayoría de los casos, el relleno sanitario (Berríos–Godoy, 2015). Esta disposición convencional no solo implica un desaprovechamiento de recursos valiosos, sino también un incremento de los costos operativos municipales y una mayor presión sobre la infraestructura de disposición final, que en muchos casos ya presenta limitaciones técnicas y de vida útil.

Una de las causas estructurales de esta situación es la limitada capacidad institucional en los entes territoriales para implementar modelos de gestión diferencial de residuos orgánicos. Factores como la falta de conocimiento técnico, la escasa apropiación comunitaria de prácticas de aprovechamiento, y la ausencia de tecnologías adaptadas a las condiciones locales, han impedido que se desarrollen soluciones sostenibles y replicables en contextos rurales y semiurbanos. Además, no se han consolidado estrategias articuladas entre los actores locales (alcaldías, operadores, comunidades) que permitan transformar el tratamiento de residuos en una oportunidad ambiental y económica (Gaviria-Cuevas, 2019).

Según (Chávez & Moya, 2019), esta problemática adquiere mayor relevancia en el contexto actual de crisis climática, donde los rellenos sanitarios se han convertido en emisores importantes de gases de efecto invernadero, particularmente metano (CH_4), producto de la descomposición anaerobia de los residuos orgánicos. Estas emisiones contribuyen de manera significativa al calentamiento global y contravienen los compromisos nacionales en materia de mitigación del cambio climático. Así, la inadecuada gestión de residuos orgánicos no solo representa una ineficiencia en la gestión pública local, sino también un factor agravante de los impactos ambientales globales.

Frente a este panorama, el presente proyecto de investigación plantea como propósito identificar el estado actual del manejo de residuos orgánicos en los tres municipios seleccionados, así aportando conocimiento útil para la toma de decisiones locales, fortalecer las capacidades técnicas municipales y proponer

modelos sostenibles de aprovechamiento que contribuyan a la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero, al cierre de ciclos de materia orgánica y a la construcción de territorios más resilientes y ambientalmente responsables.

1.1.1. Pregunta de investigación

¿Los sistemas de tratamiento de residuos sólidos orgánicos a nivel municipal, contribuyen a la reducción de las tasas de disposición en rellenos sanitarios y promueven el aprovechamiento?

1.1.2. Delimitación del problema

La gestión y tratamiento de los residuos orgánicos en los municipios de Boyacá, particularmente en los municipios de Sáchica, El Cocuy y Arcabuco, representa una problemática ambiental y socioeconómica considerable, que afecta tanto a la sostenibilidad ecológica como a la calidad de vida de las comunidades. A pesar de que se cuenta con un alto potencial para el aprovechamiento de estos residuos a través de técnicas como el compostaje y la biodigestión, estos residuos continúan siendo principalmente enviados a los rellenos sanitarios, lo que implica un desperdicio de recursos valiosos y una sobrecarga de los sistemas de disposición final.

La principal causa de esta situación radica en la falta de estrategias eficientes y sostenibles de gestión de residuos orgánicos a nivel local. La escasa capacidad institucional, el desconocimiento técnico, la falta de apropiación por parte de la comunidad y la ausencia de tecnologías adaptadas a las condiciones rurales y semiurbanas han impedido el desarrollo de un modelo integral y replicable de aprovechamiento de residuos. Esta deficiencia se ve reflejada en la ineficiencia del manejo de residuos, el aumento de costos operativos para las administraciones municipales y la incapacidad para cumplir con las normativas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente metano, derivado de la descomposición anaeróbica de estos residuos en los rellenos sanitarios.

Además, este problema se ve exacerbado por la falta de articulación entre los actores locales, como las alcaldías, los operadores y las comunidades, quienes no han logrado implementar estrategias eficaces para el aprovechamiento de residuos orgánicos. Esto ha generado una dependencia continua de los rellenos sanitarios, que no solo son una solución ineficiente sino también un factor de contaminación que agrava la crisis climática actual.

Este proyecto de investigación busca abordar estos desafíos identificando el estado actual del manejo de residuos orgánicos en los municipios de SÁCHICA, El Cocuy y Arcabuco, evaluando sus condiciones climáticas, sociales e institucionales, y formulando estrategias adaptadas a cada contexto territorial. Con el fin de promover soluciones sostenibles que no solo mejoren la eficiencia en la gestión de residuos, sino que también contribuyan a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, al cierre de ciclos de materia orgánica y a la construcción de territorios más resilientes.

1.2. JUSTIFICACIÓN

En municipios como El Cocuy, Arcabuco y Sáchica, ubicados en el departamento de Boyacá, una parte significativa de los residuos sólidos domiciliarios corresponde a materia orgánica biodegradable, que representa entre el 50% y el 70% del total de residuos generados según los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos PGIRS (DNP, 2022). Sin embargo, estos residuos siguen siendo enviados a rellenos sanitarios sin un proceso previo de aprovechamiento. Esta situación no solo incrementa los costos de disposición y reduce la vida útil de los rellenos, sino que también la disposición de estos residuos provoca la liberación considerable de metano (CH_4) un GEI, un gas cuyo efecto sobre el calentamiento global es 25 veces más potente que el dióxido de carbono (CO_2) (Sanciolo et al., 2022).

Razón por la cual el proyecto de investigación busca estudiar y proponer estrategias viables para el manejo de los residuos orgánicos en contextos municipales, con el fin de reducir la presión sobre los sistemas de disposición final y aprovechar el potencial de producción de compost, alternativas sostenibles de bajo impacto o biogás. según Oviedo Ocaña et al. (2012), a pesar de que existen tecnologías su implementación ha sido limitada por factores como la falta de conocimiento técnico local, la baja inversión en infraestructura y la ausencia de planes municipales enfocados en aprovechamiento han dificultado la adopción de este tipo de tecnologías.

El desarrollo de este proyecto permitirá identificar el estado actual del manejo de residuos orgánicos en los municipios mencionados, teniendo en cuenta sus diferencias territoriales e institucionales. Además, se busca que las estrategias planteadas sean sencillas y adaptadas y reales a las condiciones locales, que podrían ser implementadas a corto o mediano plazo, y que contribuyan a una gestión más eficiente y ambientalmente responsable frente a la inminencia de no enviar estos residuos a relleno sanitario. Los resultados del proyecto pueden apoyar procesos de planificación local, como los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS), y fortalecer capacidades técnicas en los equipos municipales.

En la actualidad, el relleno sanitario regional de Pírgua, ubicado en Tunja, actualmente recibe alrededor de 1.000 toneladas diarias de residuos sólidos provenientes de más de 140 municipios de Boyacá, así como de regiones de Cundinamarca y Santander (CORPOBOYACA, 2022). De acuerdo con estimaciones oficiales, a este sitio de disposición final le restan menos de siete años de vida útil, lo cual representa un riesgo creciente para la sostenibilidad de la gestión

de residuos en el departamento. La falta de alternativas para la disposición final y el progresivo colapso del relleno hacen urgente la adopción de estrategias de reducción y aprovechamiento desde la fuente, especialmente en municipios que aún disponen residuos orgánicos sin separación previa ni tratamiento.

En este contexto, el presente proyecto busca aportar soluciones técnicas a los municipios mencionados dentro de la investigación que les permita disminuir el volumen de residuos enviados a disposición final mediante el aprovechamiento de la fracción orgánica en los municipios de El Cocuy, Arcabuco y Sáchica. Si cada municipio logra reducir al menos un 50% de sus residuos orgánicos, como lo permite el compostaje o la biodigestión, se podría duplicar la vida útil del relleno de Pírgua y disminuir los costos asociados al transporte y disposición de residuos, lo que tendría un impacto positivo directo en las finanzas municipales y en la sostenibilidad regional. Este tipo de soluciones locales contribuyen no solo al cumplimiento de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS), sino también a una transición hacia modelos más circulares.

De este modo, la investigación no solo busca generar conocimiento aplicado sobre el manejo de residuos en zonas con baja capacidad técnica, sino también aportar propuestas a cada uno de los municipios de estudio para que, con una adecuada articulación institucional y comunitaria, puedan tener un impacto positivo en la reducción de emisiones, la valorización de residuos y la gestión ambiental local. Además, el estudio podría servir como referencia para otros municipios del departamento con condiciones similares, ya que como se mencionó anteriormente es urgente hacerle frente a los residuos generados y dispuestos en estos rellenos.

2. OBJETIVOS

2.1.1. Objetivo general

Analizar las estrategias de tratamiento y aprovechamiento de los residuos orgánicos municipales en los municipios seleccionados de Boyacá.

2.1.2. Objetivos específicos

- Identificar las características de producción de residuos sólidos orgánicos en los municipios seleccionados.
- Caracterizar las propiedades físicas y químicas de los residuos orgánicos
- Establecer las estrategias de tratamiento y aprovechamiento de residuos, enfocadas en la sostenibilidad y la reducción de su disposición en rellenos sanitarios.

3. ANTECEDENTES

El manejo de los residuos sólidos ha experimentado una notable transformación, pasando de métodos básicos a sistemas avanzados que integran ingeniería, salud pública, economía y sostenibilidad ambiental. En este contexto el libro de Tchobanoglous, Theissen y Eliassen (1982) se reconoce como una de las fuentes más exhaustivas y organizadas en relación con esta temática, al tratar en profundidad tanto los principios técnicos como los componentes administrativos y normativos.

La generación de residuos sólidos es un fenómeno inevitable ligado al crecimiento urbano y al avance tecnológico. Aunque los seres humanos han producido desechos desde tiempos remotos, fue a partir de la Revolución Industrial cuando se intensificó notablemente tanto su volumen como su diversidad. La carencia de estrategias adecuadas para su gestión ha provocado serios problemas de salud pública, entre ellos la proliferación de enfermedades transmitidas por vectores (Tchobanoglous et al., 1982).

La gestión de los residuos compostables presenta diferencias significativas en función del desarrollo económico y las políticas ambientales adoptadas por cada país. En los países desarrollados, como Alemania, Canadá y Estados Unidos, cuentan con avanzados sistemas de recolección y tecnologías para el tratamiento de residuos orgánicos (Aboulam et al., 2006). En estos países, el compostaje se ha adoptado como una medida clave para disminuir la cantidad de residuos orgánicos enviados a vertederos y al tiempo que permite generar productos orgánicos aprovechables en labores agrícolas y de jardinería. Un ejemplo destacado es Estados Unidos, donde diversas ciudades han desarrollado planes de compostaje a nivel municipal que incluyen educación ciudadana, incentivos fiscales y normativas que restringen el depósito de residuos orgánicos sin un procesamiento previo (Kashmanian & Spencer, 2013)

Por otra parte, en Alemania, Austria y los Países Bajos, la normativa ambiental ha favorecido la implementación tanto de esquemas centralizados como descentralizados para el tratamiento mediante compostaje. La clasificación y separación en la fuente de residuos orgánicos es obligatoria, además existen plantas de compostaje con sistemas automatizados de temperatura, humedad y aireación para optimizar el proceso (Montemurro & Maiorana, 2007). Estas técnicas permiten el control adecuado de la temperatura y humedad durante la fase termofílica, así garantizando la higienización del compost (Passoni & Borin, 2009). Estos países han demostrado que la implementación de normas estrictas, el uso de

tecnología apropiadas y de la participación ciudadana permite establecer sistemas sumamente eficaces para la gestión de residuos compostables (Press et al., 2013).

Japón implementa un modelo destacado que combina la responsabilidad extendida del productor con una activa participación ciudadana, mediante iniciativas locales, se promueve la separación de residuos orgánicos desde su generación, incentivando su tratamiento a través de compostaje doméstico o comunitario. Es habitual el uso de tecnologías como biodigestores anaeróbicos y sistemas de compostaje térmico. Esto ha llevado a que se reduzca significativamente la generación de residuos sólidos urbanos al implementar estos enfoques integrales y de la articulación efectiva entre los diferentes niveles gubernamentales (Bhattacharyya et al., 2003). Entre las técnicas utilizadas destacan los compostadores Bokashi, un abono orgánico obtenido del proceso de fermentación y maduración de residuos de origen vegetal o animal, utilizado como acondicionador de suelos para mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo (Lamprea Zona & Olmedo Meza, 2023).

En países como Estados Unidos, los métodos de compostaje más utilizados abarcan el compostaje aeróbico en pilas expuestas, sistemas con volteo mecánico y reactores en contenedores cerrados. En ciudades como San Francisco y Seattle han desarrollado programas municipales que integran el compostaje doméstico con el procesamiento industrial de residuos orgánicos recolectados de manera diferenciada (Brinton et al., 2008). Massachusetts aprobó una ley que obliga a cualquier empresa eliminar una tonelada o más de residuos orgánicos por semana desviando los residuos hacia el compostaje. Esta medida ha sido altamente efectiva, logrando disminuir la cantidad de residuos alimentarios enviados a los vertederos, lo que a su vez ha contribuido a la reducción de emisiones de metano y de los costos asociados a la gestión de residuos (US EPA, 2020).

En América Latina y el Caribe, el manejo de residuos se ha centrado principalmente en la recolección y disposición final, dejando a un lado prácticas como el reciclaje, el aprovechamiento y el tratamiento adecuado. En muchos países del continente, aún se utilizan botaderos a cielo abierto sin especificaciones técnicas, no hay separación en la fuente y miles de recicladores informales trabajan en condiciones de riesgo. Esta situación, sumada a una débil gestión pública y privada, refleja la crisis que enfrenta la región en la gestión de residuos sólidos (Sáez & G, 2014).

En los últimos años se han desarrollado nuevas técnicas para el tratamiento y valorización de este tipo de residuos. El digestato, también conocido como digerido, es el subproducto generado tras la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno (Odales Bernal et al., 2020), gracias a su elevado contenido de

nutrientes, especialmente de nitrógeno, este puede ser utilizado eficazmente como fertilizante en aplicaciones agrícolas. (Czekala, 2022). Los sólidos son sometidos a un proceso de deshidratación que puede incluir incineración, compostaje o aplicación directa al suelo, generando bioabono utilizable como abono orgánico en actividades agrícolas. En cuanto a la fracción líquida, esta se trata mediante filtración para producir fertilizante líquido, además de procesos específicos para la extracción de amoníaco y la recuperación de fósforo (Fonseca Figueroa, 2023).

El Tratamiento Mecánico-Biológico (TMB) consiste en separar los materiales inorgánicos con potencial de reciclaje y procesar la fracción orgánica con el fin de reducir su volumen y disminuir la cantidad de residuos que llegan a los rellenos sanitarios. Este sistema integra procesos físicos y biológicos para el manejo de residuos o fracciones que contienen una proporción considerable de materia orgánica (Rendón Muñoz, 2017). El valor potencial de los residuos está vinculado a su capacidad para generar energía, servir como materia prima en la fabricación de nuevos productos o convertirse en insumos como fertilizantes para uso agrícola, entre otros. Este aprovechamiento se desarrolla en varias etapas; la inicial corresponde al tratamiento mecánico —aunque en algunas plantas el orden puede variar—, el cual incluye tanto la recuperación de materiales con valor económico como la separación de la fracción orgánica presente en los residuos ingresados (Muñoz Rodríguez et al., 2023).

El compostaje comunitario facilita el manejo de los residuos orgánicos en el mismo lugar donde se producen, permitiendo que la propia comunidad se beneficie directamente del compost generado (Rieder Martinez, 2021). Este modelo de compostaje ha sido promovido en ciudades como San Francisco, donde se implementa el Programa Zero Waste, una iniciativa de carácter político orientada a disminuir la generación de residuos y a ampliar las oportunidades de reciclaje y compostaje. En este contexto, San Francisco define el concepto de desperdicio cero, como no enviar nada al vertedero o a procesos de incineración, en lugar de ello los productos se diseñan y utilizan de acuerdo con el principio de aprovechamiento y eficiencia, en concordancia con la jerarquía para la reducción de residuos (Pomare Lever et al., 2025)

Los países en desarrollo enfrentan diversos desafíos en la gestión de residuos orgánicos. En regiones como India y varias naciones de América Latina, el compostaje suele llevarse a cabo de forma informal, sin mecanismos adecuados de control, y frecuentemente es gestionado por cooperativas de recicladores (Moeller & Reeh, 2003). La escasez de recursos financieros, la limitada infraestructura y la baja conciencia ambiental representan obstáculos significativos para el desarrollo

de sistemas eficientes. No obstante, en contextos rurales y periurbanos, algunas organizaciones comunitarias y ONGs han promovido iniciativas sostenibles a pequeña escala que han demostrado resultados alentadores (Khalilian et al., 2002).

Actualmente, el tratamiento de residuos orgánicos en Colombia se orienta principalmente hacia la producción de compost, priorizando esta opción por encima de la valorización energética. Esto se debe a que los residuos inorgánicos son destinados al reciclaje, mientras que el compostaje representa una alternativa de bajo costo para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos. Esta tendencia evidencia la necesidad de fortalecer el conocimiento e impulsar la adopción de tecnologías innovadoras para el aprovechamiento de los residuos (Muñoz Rodríguez et al., 2023).

Colombia ha adoptado estrategias como el programa Basura Cero, contemplado en el Plan Nacional de Desarrollo 2022–2026 por medio del decreto 670 de 2025 Ley. Su propósito es impulsar una gestión integral de los residuos y avanzar hacia un modelo de economía circular, orientado a minimizar la disposición final y a fomentar prácticas sostenibles como el aprovechamiento, el reciclaje y el tratamiento adecuado de los residuos en Colombia. Asimismo, impulsa el fortalecimiento de las organizaciones de recicladores, la promoción de la educación ambiental y el diseño de incentivos para fomentar el reciclaje (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2023). La Estrategia Nacional de Economía Circular (ENEC), puesta en marcha en 2019, ha sido fundamental en la transición del modelo económico lineal hacia un enfoque circular. Esta estrategia se enfoca en seis flujos materiales prioritarios, entre ellos la biomasa y los residuos sólidos urbanos, y promueve la responsabilidad extendida del productor. La ENEC también ha impulsado la formulación de normativas orientadas al fomento del reciclaje, el ecodiseño y la valorización energética, así como la creación de un sistema nacional de información sobre economía circular (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

En el ámbito tecnológico, se han impulsado avances en los sistemas de disposición final mediante la adopción de tecnologías orientadas a la captura y aprovechamiento del biogás en los rellenos sanitarios, conforme a lo estipulado en la Ley 2169 de 2021. Adicionalmente, se han planteado modificaciones tarifarias que buscan reconocer económicamente los beneficios ambientales asociados a la implementación de estas tecnologías (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2024).

En el departamento de Boyacá, una de las iniciativas más destacadas ha sido el proyecto Boyacá Bio, desarrollado entre 2021 y 2022 por la Gobernación de Boyacá, la UPTC y otros aliados. Este proyecto contempló el co-compostaje de residuos

orgánicos con biosólidos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Tunja y Duitama, alcanzando una proporción eficiente de 67 % biosólidos y 33 % residuos. Como resultado de ello mejoró la vida útil del relleno sanitario, redujo emisiones de metano y generó bioabono para procesos de reforestación (Secretaría de Planeación Boyacá, 2022). El Plan de Desarrollo Departamental 2020–2023 incluyó la gestión de residuos y la economía circular como parte de su línea socioecológica, estableciendo metas e indicadores para fomentar la educación ambiental y soluciones territoriales (Secretaría de Planeación Boyacá, 2020)

En el ámbito comunitario, en la ciudad de Tunja, el Hogar Infantil Personitas desarrolló una iniciativa práctica de compostaje a partir de residuos orgánicos, produciendo compost destinado al mantenimiento de huertas. Además, reutilizó envases PET como macetas ecológicas, contribuyendo a la educación y sensibilización ambiental de los niños y la comunidad (López Callejas & López, 2019). En el municipio de Sáchica, la ingeniera Ambiental Karolay Chacón propuso el proyecto “Ecoparque Hitchawaia”, una iniciativa orientada a la recepción, clasificación y tratamiento de residuos sólidos urbanos reutilizables como plásticos, cartón, vidrio y metales. El objetivo principal del ecoparque es disminuir el volumen de residuos enviados a disposición final e impulsar la implementación de un modelo de economía circular a nivel local (Chacón Amado, 2021).

Evaluación de la gestión actual de residuos orgánicos

En el municipio de Arcabuco, se lleva a cabo un proceso destacado de compostaje comunitario, donde la comunidad local participa activamente en la separación y tratamiento de los residuos orgánicos. Este proceso se complementa con la recolección selectiva de residuos orgánicos, que se realiza cada jueves mediante una ruta establecida. Durante esta actividad, se recolectan semanalmente cerca de 3.33 toneladas de residuos orgánicos, los cuales son gestionados para la posterior transformación en abono natural, a esto se le conoce como compostaje comunitario a pesar de que las prácticas como se desarrolla esta actividad no es tan técnica.

En El Cocuy, los residuos orgánicos se disponen siguiendo lo establecido en el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) del municipio. En este caso, los residuos orgánicos son tratados de manera diferenciada y son enviados a un predio de propiedad privada, de acuerdo con la investigación exploratoria en el cocuy hace más de 10 años lograron producir abono orgánico con registro ICA. Sin embargo, esta actividad por poca comercialización y baja importancia política este proyecto tubo que acabarse. Este es un ejemplo que el compost no es una actividad nueva

en Boyacá, sin embargo, esta práctica resalta la necesidad de mejorar la gestión de residuos orgánicos, especialmente en una región con un gran potencial para el aprovechamiento de este tipo de materiales.

Por último, en Sáchica, los residuos orgánicos se recolectan junto con otros tipos de residuos y se envían directamente al relleno sanitario. El aprovechamiento de estos residuos en el municipio es limitado, con un bajo porcentaje destinado a procesos como el compostaje para cerca de 4 a 6 familias. Esta falta de una estrategia clara para la gestión de residuos orgánicos genera una oportunidad significativa para mejorar la eficiencia en su tratamiento y aprovechamiento.

3.1. MARCO LEGAL

La gestión de residuos sólidos en Colombia cuenta con diferentes normas que constituyen el marco legal esencial para orientar la gestión de residuos en el país, promoviendo prácticas sostenibles que reduzcan el impacto ambiental y favorezcan el uso eficiente de los recursos disponibles como se muestra en Tabla 1. Asimismo, establecen directrices para el aprovechamiento, tratamiento y disposición final de los residuos, contribuyendo al fortalecimiento de la economía circular y al cumplimiento de los objetivos ambientales nacionales.

Tabla 1. Tabla de la normativa colombiana.

Año	Norma	Descripción
1968	Decreto 2202 de 1968	Por el cual se reglamenta la industria y comercio de los abonos o fertilizantes químicos simples, químicos compuestos, orgánicos naturales, orgánicos reforzados, enmiendas y acondicionadores del suelo, y se derogan unas disposiciones.
1993	Ley 99 de diciembre 22 de 1993	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones.
1994	Ley 142 de 1994	Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios donde se incluye el servicio público de aseo y se dictan otras disposiciones.
1996	Decreto 605 de 1996	El presente Decreto establece normas orientadas a regular el servicio público domiciliario de aseo en materias referentes a sus componentes, niveles, clases, modalidades y calidad y al régimen de las entidades prestadoras del servicio y de los usuarios.
1997	Política Nacional para la gestión Integral de Residuos, 1997	Se fundamentó principalmente a través del CONPES 3874, se enfocó en la minimización y recuperación de residuos, promoviendo la producción más limpia y el reciclaje según el Departamento Nacional de Planeación.
1998	Política Nacional para la gestión Integral de Residuos, 1998	Se fundamentó en el desarrollo sostenible, buscando equilibrar la minimización de impactos ambientales, el crecimiento económico y la mejora de la calidad de vida, con un enfoque más amplio en la gestión integral de residuos.
2001	Resolución 201 de 2001	Por la cual se establecen las condiciones para la elaboración, actualización y evaluación de los Planes de Gestión y Resultados.
2003	Decreto 1505 del 4 de junio de 2003	Por el cual se modifica parcialmente Decreto 1713 de 2002 (derogado por el decreto 2981 de 2013) en relación con los planes de gestión integral de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones.

Año	Norma	Descripción
2014	Resolución 754 del 25 de noviembre de 2014	Por la cual se adopta la metodología para la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, y actualización de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos.
2015	Decreto 1077 de mayo de 2015	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio, con subsecciones para la recolección y transporte selectivo de residuos para aprovechamiento, y la gestión integral de residuos sólidos.
2017	RES 330 - 2017, Reglamento Técnico Del Sector Agua Potable Y Saneamiento Básico (RAS)	Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005 y 2320 de 2009.
2025	Decreto 670 de 2025	Este decreto establece la obligación de actualizar los PGIRS por parte de municipios, distritos y esquemas asociativos territoriales, con la metodología correspondiente.

Fuente: Autor.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS

Los residuos orgánicos son aquellos materiales de origen vegetal o biológico que se descomponen fácilmente mediante la acción de microorganismos. Este tipo de desechos incluye restos de alimentos o partes no comestibles, tanto de origen doméstico como procedentes de procesos industriales (Rojas Avendaño, 2022).

Según Sánchez & Rojas Vargas (2015) los residuos orgánicos se pueden calificar en tres grandes categorías: (1) restos de comida, (2) excretas de animales y (3) residuos vegetales de jardinería. Los restos de comida, también llamados biorresiduos domésticos, comprenden sobras, alimentos en mal estado y desperdicios generados durante la preparación de alimentos. Estos pueden dividirse en residuos crudos y cocidos, debido a sus distintas propiedades físicas y químicas (Rojas Vargas, 2010). Las excretas animales corresponden a los residuos del metabolismo de los alimentos ingeridos, en donde los nutrientes no absorbidos son expulsados en forma de heces y orina (Sánchez & Rojas Vargas, 2015). Por último, los residuos vegetales de jardinería se generan durante las actividades de poda, corte y limpieza de zonas verdes (Palomino Hoyos & García Buitrago, 2020).

Las actividades y el consumo de recursos en las zonas urbanas están estrechamente vinculados con la cantidad y tipo de residuos que producen, evidenciando una relación directa entre los insumos utilizados y los desechos generados (Marquez Rodriguez et al., 2019). En los municipios, los residuos orgánicos se generan principalmente en los hogares, comercios de alimentos, instituciones, zonas verdes y actividades agropecuarias. Su origen está asociado al consumo y preparación de alimentos, así como a labores de poda y mantenimiento de jardines. También provienen de plazas de mercado, restaurantes y procesos agrícolas, donde se producen restos vegetales y excretas animales (Martínez Sepúlveda, 2015)

En el Decreto 838 de 2005 se estableció formalmente el uso de los rellenos sanitarios como la principal tecnología de disposición final de los residuos sólidos municipales en Colombia, sustituyendo prácticas anteriores como los botaderos a cielo abierto. Este método es utilizado por aproximadamente el 92 % de los municipios del país en los 94 rellenos autorizados por las autoridades ambientales de los cuales 3 se encuentran en Boyacá (SUPERSERVICIOS, 2024).

Lo que pretenden los rellenos sanitarios es la disposición de residuos en el suelo de manera segura, la cual consiste en colocar capas de residuos compactados sobre un terreno previamente impermeabilizado, con el fin de prevenir la contaminación de las fuentes subterráneas de agua, y cubrirlas posteriormente con capas de tierra (Ulloa Cuzco, 2005). En Colombia, los rellenos sanitarios enfrentan grandes retos ante el acelerado aumento de residuos sólidos. Su limitada capacidad y la mala planificación en su gestión han generado impactos ambientales graves, ya que la descomposición de los residuos produce compuestos difíciles de tratar y controlar (Bedoya Jiménez, 2023). Según un informe de la defensoría del pueblo del 2024 en Colombia, de los 94 lugares destinados para la disposición final de residuos, 24 ya han superado su vida útil, 46 se encuentran en una fase crítica con un periodo restante de entre 0 y 3 años, y 21 cuentan con una proyección operativa de entre 3 y 5 años.

4.2. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS

Las propiedades físicas más relevantes de los residuos sólidos orgánicos incluyen el peso específico, el nivel de humedad, así como el tamaño y la distribución de las partículas. Estos factores inciden de manera significativa en la eficiencia del transporte, la facilidad de compactación, la adecuada aireación durante los procesos biológicos y la rapidez con la que se descompone la materia orgánica, aspectos clave para su manejo y tratamiento efectivo. La incorporación de estas variables en el diseño y funcionamiento de las instalaciones permite fortalecer el control ambiental, minimizar los riesgos asociados y maximizar la eficiencia en los procesos de aprovechamiento (Rodrigo Ilarri & Rodrigo Clavero, 2025).

Por otro lado, conocer los componentes químicos predominantes de los residuos sólidos orgánicos (RSO) es fundamental. Esto incluye, entre otros aspectos, la realización de un análisis elemental del residuo, que generalmente contempla la determinación de los porcentajes de carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), azufre (S) y el contenido de cenizas. Estos datos permiten conocer la composición química de la fracción orgánica, para establecer mezclas adecuadas de materiales que aseguren relaciones carbono/nitrógeno (C/N) óptimas para los procesos biológicos, como el compostaje o la digestión anaerobia (Rivas-Nichorzon & Silva-Acuña, 2020).

Cuando se pretende utilizar la fracción orgánica de los residuos para la generación de productos biológicos como compost, biogás, bioabonos o mediante procesos como la digestión anaerobia, resulta fundamental contar con información detallada

sobre los nutrientes esenciales y los elementos presentes en el material residual. Este conocimiento permite evaluar adecuadamente los posibles usos finales de los subproductos obtenidos tras los procesos de conversión biológica, asegurando su viabilidad y su valor como insumos agrícolas o energéticos. Finalmente, la agencia de cooperación alemana estableció la GUÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE GESTIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS la cual recomienda los pasos y estrategias de alternativas de proyectos de este tipo (Vishwas Vidyaranya & Burgos, 2023)

4.3. TECNOLOGÍAS DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS

Colombia no cuenta con un informe oficial que documente el uso de tecnologías de tratamiento de residuos usados en el país. Pero de acuerdo con la información disponible, el compostaje se posiciona como la principal estrategia empleada para el aprovechamiento de residuos. En cuanto a tecnologías emergentes, destaca la digestión anaerobia, la cual permite la generación y aprovechamiento de biogás a través de plantas especializadas en rellenos sanitarios, aunque su implementación en el país aún se encuentra en etapas iniciales (Muñoz Rodríguez et al., 2023).

Compostaje

El compostaje es un proceso aeróbico que transforma los residuos orgánicos en compost mediante la acción de microorganismos, que descomponen la materia orgánica en un producto estable, maduro y útil para mejorar la fertilidad del suelo (Sayara et al., 2020). Este proceso requiere condiciones óptimas de oxígeno, temperatura y humedad. En Colombia, el compostaje se utiliza principalmente en áreas rurales y semiurbanas, donde se destacan sus beneficios para la agricultura, ya que los abonos orgánicos mejoran la estructura del suelo, aumentan su capacidad de retención de humedad y aportan nutrientes esenciales.

Según el MANUAL DE COMPOSTAJE DEL AGRICULTOR de la FAO (2013) el compostaje es un proceso biológico que se lleva a cabo en condiciones aeróbicas, es decir, en presencia de oxígeno, lo que permite la descomposición de los residuos orgánicos por parte de microorganismos. Para asegurar la adecuada transformación de los restos orgánicos en un material homogéneo y asimilable por las plantas, es fundamental controlar varios parámetros durante las distintas fases del compostaje.

La temperatura es uno de los factores clave en este proceso. En la fase mesófila, la temperatura comienza a subir desde los valores ambientales hasta alcanzar los

45°C debido a la actividad microbiana. En la fase termófila, las temperaturas pueden superar los 60°C, lo que permite la higienización del material, destruyendo patógenos, semillas de maleza y quistes de helmintos. Finalmente, en la fase de enfriamiento, la temperatura desciende hasta los 40-45°C y, en la fase de maduración, se estabiliza a temperatura ambiente.

En cuanto a la humedad, es importante mantener un rango entre 45% y 60% para asegurar que los microorganismos puedan realizar sus funciones adecuadamente. Si la humedad baja por debajo del 45%, la actividad microbiana se ve afectada, deteniendo el proceso de descomposición. Por otro lado, si la humedad supera el 60%, se genera un ambiente anaeróbico que impide la oxigenación del material y puede producir malos olores.

La relación carbono-nitrógeno (C:N) también es crucial para el buen desarrollo del compostaje. En la fase inicial, la relación ideal debe estar entre 25:1 y 35:1. Si la relación es demasiado alta en carbono, el proceso se ralentiza, por lo que se recomienda añadir materiales ricos en nitrógeno, como estiércol, para equilibrar la mezcla. A medida que el compostaje avanza, la relación debe disminuir a 15-20:1, y finalmente estabilizarse en 10-15:1 en la fase de maduración.

El pH del compostaje varía durante el proceso. En la fase mesófila, el pH tiende a ser ligeramente ácido debido a la producción de ácidos orgánicos. Sin embargo, en la fase termófila, el pH aumenta debido a la conversión del amoníaco en amoníaco gaseoso. El rango óptimo de pH para la actividad bacteriana es de 6,5 a 8,5, lo que permite la mejor descomposición de la materia orgánica. Si el pH es muy bajo, se puede añadir material con más nitrógeno, y si es demasiado alto, se debe agregar material rico en carbono.

El tamaño de las partículas es otro parámetro importante que influye en la aireación y la descomposición. Las partículas deben ser lo suficientemente pequeñas para permitir una buena circulación de aire, pero no tan finas como para evitar la oxigenación del material. Un tamaño de 5 a 30 cm es ideal para comenzar el proceso. Si las partículas son demasiado grandes, se recomienda picarlas para asegurar una adecuada aireación. La aireación es esencial para el proceso de compostaje, ya que los microorganismos requieren oxígeno para descomponer los residuos. La concentración de oxígeno no debe caer por debajo del 5%, siendo el nivel ideal cercano al 10%. Si hay baja aireación, se debe voltear la mezcla y añadir material estructurante para mejorar la circulación de aire.

En la Tabla 2 se muestra las distintas fases del proceso de compostaje en función de la temperatura, pH y oxígeno (O_2), y cómo estos parámetros cambian a lo largo del tiempo. En la fase mesófila (2-5 días), la temperatura es más baja y los microorganismos mesófilos, como las bacterias, descomponen los azúcares, produciendo ácido y reduciendo el pH. En la fase termofílica (1-3 semanas), la temperatura aumenta debido a la actividad microbiana, llegando hasta los 60-70°C, lo que favorece la descomposición de cera, hemicelulosa y polímeros. En esta fase, los hongos y bacterias contribuyen al proceso, y el pH aumenta. En la fase mesofílica II (2-5 semanas), la temperatura disminuye, la actividad bacteriana disminuye y el proceso de descomposición continúa con los hongos. Finalmente, en la fase de maduración (3-6 meses), el proceso de compostaje se estabiliza, alcanzando un pH cercano a 7 y una concentración baja de oxígeno (5%), lo que indica que el compost está casi listo para usarse como abono.

Tabla 2. Parámetros para el compostaje.

Parámetro	Rango Ideal	Acondicionamiento
Temperatura	45°C – 70°C	Añadir material fresco o aumentar la aireación si la temperatura es baja.
Humedad	45% - 60%	Añadir agua o material húmedo si la humedad es baja, o material seco si es alta.
Relación C:N	25:1 – 35:1 (inicial)	Añadir material rico en nitrógeno si hay exceso de carbono o material rico en carbono si hay exceso de nitrógeno.
pH	6,5 – 8,5	Ajustar la relación C:N y añadir materiales adecuados para regular el pH.
Tamaño de Partícula	5 – 30 cm	Picar el material si es demasiado grande, o añadir material mayor si es demasiado fino.
Aireación (Oxígeno)	~10%	Voltear el material y/o añadir material estructurante si hay baja aireación.
Densidad	250-400 kg/m ³	Monitorear y ajustar el tamaño de la pila para mantener la densidad óptima.
Tiempo de Proceso	2-6 meses	Mantener condiciones óptimas durante todo el proceso.

Fuente: Autor.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra las distintas fases del proceso de compostaje en función de la temperatura, pH y oxígeno (O_2),

y cómo estos parámetros cambian a lo largo del tiempo. En la fase mesófila (2-5 días), la temperatura es más baja y los microorganismos mesófilos, como las bacterias, descomponen los azúcares, produciendo ácido y reduciendo el pH. En la fase termofílica (1-3 semanas), la temperatura aumenta debido a la actividad microbiana, llegando hasta los 60-70°C, lo que favorece la descomposición de cera, hemicelulosa y polímeros. En esta fase, los hongos y bacterias contribuyen al proceso, y el pH aumenta. En la fase mesofílica II (2-5 semanas), la temperatura disminuye, la actividad bacteriana disminuye y el proceso de descomposición continúa con los hongos. Finalmente, en la fase de maduración (3-6 meses), el proceso de compostaje se estabiliza, alcanzando un pH cercano a 7 y una concentración baja de oxígeno (5%), lo que indica que el compost está casi listo para usarse como abono.

Compostaje Termofílico (Rápido)

El compostaje termofílico rápido o compostaje acelerado utiliza temperaturas más altas que el compostaje tradicional, lo que acelera el proceso de descomposición. Esta tecnología reduce significativamente el tiempo de tratamiento de los residuos orgánicos, convirtiéndolos en compost en cuestión de días en lugar de semanas o meses, lo que la hace muy útil para áreas con una gran cantidad de residuos.

Autores como Wang & Wu, (2021) establecieron que el compostaje hipertermofílico (HTC) es una tecnología avanzada para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos que mejora significativamente la eficiencia del proceso de compostaje en comparación con el compostaje termofílico convencional (TC). Este proceso se basa en la inoculación de microbios hipertermófilos que permiten alcanzar temperaturas superiores a los 80°C sin la necesidad de una fuente térmica externa. La fase hipertermofílica de HTC permite una descomposición mucho más rápida y eficiente de la materia orgánica, alcanzando una mayor humificación y produciendo un compost de mejor calidad en un periodo de 5 a 7 días, en comparación con los 3-6 meses requeridos en el compostaje convencional.

Recientemente Z. Wang et al., (2025), estableció que el sistema de compostaje hipertermofílico (HTC) es un proceso de compostaje especial, que explota una temperatura extremadamente alta de aproximadamente 80–100 °C y que si bien esta tecnología recientemente desarrollada no se usa ampliamente es debido a sus inóculos microbianos especiales, que contienen una gran cantidad de bacterias hipertermófilas.

Durante el proceso de HTC, se observan varias etapas clave. Primero, la fase de aumento de temperatura lleva a los residuos a temperaturas superiores a los 80°C. Luego, en la fase hipertermofílica, los microbios especializados, como *Thermus* y *Bacillus*, descomponen compuestos como la celulosa y la hemicelulosa, liberando energía térmica. En la fase termofílica, la temperatura se mantiene entre 60 y 80°C, lo que permite la eliminación de patógenos, microplásticos y residuos de antibióticos, mientras que, en la fase de maduración, el compost final se estabiliza y se convierte en un producto adecuado para su uso en agricultura.

Las principales ventajas del compostaje hipertermofílico incluyen una alta eficiencia en la descomposición de residuos, un periodo de compostaje más corto y la producción de compost de alta calidad. Además, este proceso reduce las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), mejora la eliminación de microplásticos y promueve la remediación de suelos contaminados con metales pesados. Sin embargo, el HTC también presenta algunas limitaciones. Por ejemplo, los residuos ricos en lípidos o salinidad pueden afectar la estabilidad del proceso. Además, aunque el HTC acelera la descomposición, puede resultar en una pérdida de eficiencia en los nutrientes del compost, lo que reduce la efectividad del fertilizante producido.

Los parámetros óptimos para el HTC incluyen una temperatura de más de 80°C durante la fase hipertermofílica, una relación C:N de 25:1 y 35:1 y un contenido de agua inicial del 50% en los residuos. Además, se recomienda una aireación mecánica de 20 m³/(t·h) para asegurar que la actividad microbiana y la conversión de la materia orgánica ocurran de manera eficiente.

Wang & Wu, (2021) manifiestan que el compostaje hipertermofílico (HTC) presenta ventajas significativas sobre el compostaje termofílico convencional (TC), especialmente en términos de eficiencia y calidad del proceso de compostaje. A diferencia del TC, donde las temperaturas alcanzan entre 50°C y 70°C, el HTC logra temperaturas superiores a 80°C durante la fase hipertermofílica, lo que acelera considerablemente la descomposición orgánica, reduciendo el tiempo del proceso de 30-50 días en TC a 15-25 días en HTC. La alta temperatura en HTC no solo mejora la mineralización y la humificación de los residuos, sino que también permite la inactivación de patógenos de manera más eficiente, con una tasa de eliminación significativamente más alta que en el TC. Además, el HTC reduce más rápidamente el volumen de residuos y pierde menos nitrógeno durante el proceso, lo que optimiza la calidad del compost final y la eficiencia del fertilizante producido.

En comparación con el compostaje convencional, el compostaje hipertermofílico también presenta un proceso más rápido y eficiente en la eliminación de microplásticos, residuos de antibióticos y metales pesados, lo que mejora la calidad del compost y tiene un impacto ambiental positivo al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. El uso de microbios hipertermofílicos, como las bacterias *Thermus* y *Bacillus*, promueve una descomposición más rápida de materiales orgánicos difíciles, como la lignina y celulosa, que no se degradan tan fácilmente en procesos más convencionales. Sin embargo, el HTC también presenta desafíos, como el control del C:N inicial, que debe ser mantenido en un nivel óptimo de 10:1 para maximizar la actividad microbiana. A pesar de sus ventajas, el proceso HTC aún necesita más investigación para optimizar su aplicación en residuos con altos contenidos de lípidos y salinidad, y para mejorar la eficiencia de fertilizantes producidos, lo que aún limita su adopción generalizada.

Vermicompostaje – (Lombricultora)

El vermicompostaje es una técnica biológica que utiliza lombrices, especialmente la lombriz roja californiana (*Eisenia fetida*), para descomponer residuos orgánicos y transformarlos en un abono rico en nutrientes conocido como humus de lombriz o vermicompost. A diferencia del compostaje convencional, que depende de microorganismos termofílicos y altas temperaturas, el vermicompostaje se realiza a temperaturas moderadas (entre 15°C y 25°C), lo que favorece la actividad de microorganismos mesofílicos y mejora la eficiencia de la descomposición. Este proceso natural no requiere altas temperaturas, pero sí un ambiente controlado en términos de humedad, oxígeno y temperatura (Adhikary, 2012).

El vermicompostaje se distingue por la participación activa de las lombrices en el proceso de descomposición, lo que mejora la calidad final del compost. Las lombrices no solo descomponen los residuos, sino que también generan un ambiente favorable para la actividad bacteriana, lo que aumenta la eficiencia del proceso. Además, una ventaja significativa sobre el compostaje convencional es la capacidad del vermicompostaje para reducir la formación de gases indeseables, como el amoníaco (NH₃). Las lombrices favorecen la aireación del material y previenen condiciones anaeróbicas, lo que mejora la calidad del aire durante el proceso y reduce la emisión de gases de efecto invernadero y malos olores.

El vermicompost es también más rico en nutrientes de liberación lenta, como ácidos húmicos, que mejoran la estructura del suelo, aumentan la capacidad de retención de agua y promueven la salud de las plantas. Además, el vermicompostaje se ha demostrado ser un proceso más rápido y menos costoso en comparación con el

compostaje tradicional, ya que no requiere maquinaria pesada ni sistemas complejos de aireación, lo que lo convierte en una opción eficiente y accesible para el tratamiento de residuos orgánicos en diversas escalas.

El proceso de vermicompostaje requiere ciertas condiciones controladas para asegurar que las lombrices puedan descomponer eficientemente los residuos orgánicos y generar lombricompost de alta calidad. A continuación, se detallan las y condiciones ideales para este proceso:

Temperatura: La temperatura óptima se encuentra entre 15°C y 25°C. A temperaturas por debajo de los 5°C, las lombrices se ralentizan o entran en hibernación, mientras que, a temperaturas superiores a los 30°C, las lombrices pueden sufrir daño o morir.

Humedad: El rango ideal de humedad en el material de compostaje debe estar entre 50% y 70%. Si la humedad baja por debajo de este rango, las lombrices y los microorganismos no podrán funcionar eficientemente, lo que ralentiza el proceso. Si la humedad es demasiado alta, puede generar condiciones anaeróbicas, lo que lleva a la formación de malos olores y podría matar a las lombrices.

Aireación (Oxígeno): El vermicompostaje es un proceso aeróbico, lo que significa que las lombrices y los microorganismos necesitan oxígeno para descomponer los residuos. Por lo tanto, es esencial asegurar una buena aireación en el contenedor de vermicompostaje.

Relación C:N (Carbono:Nitrógeno): La relación C:N ideal para el vermicompostaje debe estar en un rango de 25:1 a 35:1 en la mezcla inicial de materiales. Esta proporción permite que las lombrices y los microorganismos realicen la descomposición de manera eficiente. Si hay un exceso de carbono (relación C:N alta), las lombrices no podrán procesar los materiales lo suficientemente rápido, ralentizando el proceso. Si hay un exceso de nitrógeno, como en materiales muy frescos o ricos en proteínas, puede causar un exceso de amoníaco y malos olores, lo que afecta negativamente a las lombrices.

Tamaño de Partículas: Las partículas deben ser lo suficientemente pequeñas para que las lombrices puedan acceder y consumir la materia orgánica fácilmente. Un tamaño de partículas de 5 a 30 cm es adecuado para

facilitar el proceso de descomposición, permitiendo a las lombrices trabajar eficazmente sin crear zonas de compactación o dificultades para la aireación.

pH: El pH ideal para el vermicompostaje debe estar en un rango de 6.0 a 8.0, siendo ligeramente alcalino. Si el pH es demasiado ácido (por debajo de 6), el proceso de descomposición se ralentiza y las lombrices pueden verse afectadas. Si el pH es demasiado alcalino (por encima de 8), la actividad microbiana y lombrícida también puede disminuir.

Espacio y Ubicación: El espacio debe ser suficiente para permitir que las lombrices se desplacen y accedan al material. El vermicompostador puede ubicarse en interiores o exteriores, dependiendo de las condiciones climáticas

El proceso de vermicompostaje generalmente dura entre 2 a 4 meses. Durante este tiempo, las lombrices se adaptan al nuevo ambiente, descomponen los residuos orgánicos a un ritmo acelerado en las fases iniciales, y finalmente, el compost madurado se estabiliza, convirtiéndose en un abono rico en nutrientes.

Digestión anaeróbica

En cuanto a las tecnologías emergentes, la digestión anaerobia se destaca por su capacidad para generar biogás (principalmente metano) a partir de la descomposición de residuos orgánicos en ausencia de oxígeno. Este biogás puede ser utilizado como fuente de energía renovable, reemplazando combustibles fósiles. Además, el proceso produce un subproducto, el digestato, que es un fertilizante rico en nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio (Acosta & Abreu, 2005). Sin embargo, su implementación en Colombia aún enfrenta obstáculos debido a las altas inversiones iniciales necesarias para la infraestructura y la tecnología.

La digestión anaerobia es un proceso de fermentación microbiana que ocurre en ausencia de oxígeno, generando principalmente gases como el metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), conocido como biogás como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Aunque su poder calorífico no es muy alto, el biogás puede reemplazar eficientemente al gas de ciudad y utilizarse en diversas aplicaciones, como fuente de calor, en calderas de vapor o como combustible para motores conectados a generadores eléctricos. Además, en este proceso se genera un subproducto, un lodo, que puede utilizarse como abono para la fertilización de suelo, rico en nitrógeno, fosforo y potasio.

Khalid et al. (2011), estableció que, en los sistemas de digestión anaeróbica, se pueden combinar diversos materiales orgánicos, lo que se denomina co-digestión. Esto implica la utilización conjunta de materiales como estiércol, residuos alimentarios, cultivos energéticos, residuos de cultivos y grasas, aceites y grasas provenientes de trampas de grasa de restaurantes, entre otros. La co-digestión permite incrementar la producción de biogás a partir de residuos orgánicos de bajo rendimiento o difíciles de digerir.

Para optimizar este proceso y obtener resultados eficientes, se deben considerar diversos parámetros y condiciones:

Temperatura: Se recomienda operar en el rango mesofílico (30–40°C) para una producción óptima de metano. Temperaturas más altas, dentro del rango termofílico (50–60°C), pueden acelerar el proceso, pero también pueden causar la producción de compuestos volátiles como el amoníaco, lo cual puede inhibir la actividad metanogénica. Si la temperatura baja de 5°C o supera los 45°C, la actividad bacteriana se ve afectada negativamente

pH: El rango de pH ideal para la digestión anaeróbica es de 6.8 a 7.2. Un pH inferior a 6.5 puede inhibir la actividad de las bacterias metanogénicas, mientras que valores superiores a 8.0 pueden causar la acumulación de amoníaco tóxico, lo que afecta la eficiencia del proceso

Humedad: Los niveles de humedad deben mantenerse entre el 60% y 80% para asegurar una buena digestión. Si la humedad es demasiado baja, los microorganismos no podrán trabajar eficientemente, y si es demasiado alta, puede ocurrir una acumulación excesiva de líquidos que interfiera con la formación de biogás

Relación C/N: Para una descomposición eficiente, la relación Carbono/Nitrógeno (C/N) debe estar entre 20:1 y 30:1. Si el nitrógeno es excesivo, pueden producirse compuestos tóxicos como el amoníaco, que inhiben la actividad metanogénica. Co-digestar materiales con diferentes relaciones C/N puede mejorar la eficiencia

Tiempo de retención hidráulico (TRH): El tiempo de retención hidráulico influye directamente en la eficiencia del proceso de digestión. Generalmente, el TRH óptimo es de 15 a 30 días, aunque esto puede variar dependiendo del tipo

de residuo y las condiciones del bioreactor. Los tiempos más cortos pueden no permitir una digestión completa

Carga orgánica: La carga orgánica (cantidad de material que entra en el bioreactor) debe ser controlada para evitar la sobrecarga del sistema, lo que puede generar ineficiencias en la producción de biogás. La carga ideal depende del diseño del bioreactor y del tipo de residuo, pero generalmente se recomienda mantener una tasa de carga que no sobrepase 10 a 15 kg de residuos sólidos por metro cúbico por día ($\text{kg/m}^3/\text{d}$).

El proceso de digestión anaeróbica genera dos productos valiosos: biogás y digestato.

Biogás: El biogás está compuesto principalmente por metano (CH_4), que representa entre el 50% y el 75% del gas, similar al gas natural. También contiene dióxido de carbono (CO_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), vapor de agua y pequeñas cantidades de otros gases. La energía contenida en el biogás puede utilizarse como el gas natural para proporcionar calor, generar electricidad y alimentar sistemas de refrigeración, entre otros usos. Este puede ser vendido e inyectado al sistema de distribución de gas natural, comprimido para ser utilizado como combustible vehicular, o procesado aún más para generar combustibles alternativos para transporte, productos energéticos u otros bioquímicos y bioproductos avanzados.

Digestato: El digestato es el material residual que queda después del proceso de digestión. Este está compuesto por una parte líquida y una parte sólida, las cuales se separan y manejan de manera independiente, ya que cada una tiene valor que puede ser aprovechado con distintos tratamientos posteriores. Con el tratamiento adecuado, tanto la porción sólida como la líquida del digestato pueden utilizarse en varias aplicaciones beneficiosas, tales como: cama para animales (sólidos), fertilizantes ricos en nutrientes (líquidos y sólidos), material base para productos bio-basados (como bioplásticos), compost rico en materia orgánica (sólidos) y/o como enmienda del suelo (sólidos).

Incineración

La incineración es un proceso térmico que utiliza altas temperaturas para quemar los residuos orgánicos, reduciéndolos a cenizas, gases y calor. Esta tecnología es

ampliamente utilizada para la disposición de residuos sólidos cuando no es viable su reciclaje o compostaje. Si bien la incineración puede generar energía en forma de calor o electricidad, su impacto ambiental es considerable, ya que las emisiones de gases contaminantes como el dióxido de carbono (CO₂) y las partículas finas pueden contribuir al calentamiento global y a la contaminación atmosférica. Sin embargo, en ciertos contextos urbanos con alta densidad de población y restricciones de espacio, la incineración puede ser una opción viable si se emplean tecnologías avanzadas de filtración y control de emisiones.

Esta tecnología puede reducir el volumen de los residuos en más de un 90%. Las plantas de incineración modernas suelen incorporar sistemas de recuperación de calor y generación de energía para aprovechar la energía térmica producida durante el proceso de incineración. Sin embargo, cuando se trata de incinerar residuos orgánicos, existen varios desafíos. Uno de los principales problemas es el alto contenido de humedad de los materiales orgánicos, como los residuos alimentarios, que los hace menos adecuados para la incineración. Los residuos orgánicos generalmente contienen una cantidad significativa de agua, y el contenido de humedad puede superar el 50%. La presencia de esta humedad conlleva un mayor consumo de combustible y mayores requisitos de energía para la combustión, lo que hace que el proceso sea significativamente más costoso. Esta ineficiencia puede aumentar los costos operativos de la planta de incineración y reducir el potencial de recuperación de energía.

Para asegurar una combustión completa y cumplir con los estrictos estándares de emisiones (por ejemplo, la Directiva de Incineración de Residuos de la UE), las instalaciones de incineración modernas utilizan diversas tecnologías avanzadas, entre las que se incluyen:

Combustión: Los residuos se alimentan de manera continua en un horno donde se incineran a altas temperaturas (850°C o más) con un suministro adecuado de aire. Esta alta temperatura asegura que los residuos se quemen completamente y que los compuestos orgánicos, incluidos las dioxinas, se descompongan.

Caldera/Turbina de vapor: El calor generado por la combustión se utiliza para producir vapor en una caldera. El vapor impulsa una turbina, que genera electricidad. El calor sobrante puede usarse para otros fines, como la calefacción de piscinas.

Limpieza de los gases de escape: Los gases de escape se tratan para cumplir con los estándares ambientales. Las principales tecnologías incluyen:

- Lavadores secos o húmedos: Estos neutralizan y eliminan los gases ácidos (por ejemplo, óxidos de azufre, cloruro de hidrógeno) rociando polvo de cal o una mezcla atomizada de lechada en los gases de escape.
- Inyección de Carbono Activado: Este proceso ayuda a eliminar metales pesados y contaminantes orgánicos, como las dioxinas.
- Filtros de bolsa: Estos filtros eliminan polvo y partículas finas de los gases de escape.
- Reducción Selectiva No Catalítica: Este método reduce los óxidos de nitrógeno, que contribuyen al smog urbano, reaccionándolos con amoníaco o urea.

Manejo de los residuos de ceniza: El proceso de incineración produce cenizas de fondo y cenizas volátiles. La ceniza de fondo puede reutilizarse en construcción o disponerse en vertederos, mientras que la volátil suele estabilizarse con cemento y enviarse a vertederos especializados bajo control ambiental. Como alternativa, la fusión de ceniza transforma estos residuos en productos inertes y reutilizables en construcción, aunque con un costo más elevado que los métodos convencionales.

Aprovechando esta alternativa con la termovalorización, un proceso que combina la incineración de residuos con la recuperación de calor para generar energía eléctrica y térmica, también representa una alternativa para el tratamiento de residuos orgánicos e inorgánicos (Rocha Niño & Rodríguez Bolaños, 2024). Sin embargo, este tipo de tecnologías aún no han sido implementadas en Colombia debido a las limitaciones económicas, sociales, técnicas y ambientales.

Gasificación de Biomasa

La gasificación es un proceso en el cual la biomasa o residuos orgánicos se calientan en presencia de una cantidad limitada de oxígeno (aire) o de vapor. Este proceso no implica una combustión completa, sino que la biomasa se descompone a temperaturas elevadas (generalmente entre 700°C y 1,000°C) para producir gas de síntesis (syngas). El syngas está compuesto principalmente por monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H₂) y metano (CH₄), que pueden ser utilizados para

generar energía, como combustible para motores, o incluso como materia prima para la producción de otros productos químicos.

Autores como Lapuerta et al., 2008) y Frolov, 2021) establecen que la gasificación de residuos biomásicos es una tecnología que permite transformar residuos orgánicos, como los de poda de árboles y restos de la industria, en gas de síntesis (producir gas) compuesto principalmente por monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H₂) y metano (CH₄). Este gas puede utilizarse para generar electricidad, calor, o incluso como combustible para motores de combustión interna o turbinas de gas. A diferencia de la incineración, la gasificación no produce grandes cantidades de cenizas, y el gas generado tiene un mayor valor energético, lo que la convierte en una opción atractiva para el tratamiento de residuos en aplicaciones locales.

Una de las principales ventajas de la gasificación es su capacidad para generar un gas de síntesis limpio y útil, que puede ser utilizado en motores de combustión o en celdas de combustible. Este proceso es flexible, permitiendo el uso de diferentes tipos de biomasa, como residuos agrícolas (poda de olivo o vid), residuos forestales (pino), y residuos industriales (aserrín, orujo de uva). Además, la co-gasificación (combinar biomasa con carbón) mejora la calidad del gas producido, aumentando la eficiencia del proceso y reduciendo las emisiones de CO₂ y otros contaminantes derivados del carbón.

Sin embargo, la gasificación presenta también desventajas y desafíos. Uno de los principales es que la eficiencia del proceso está muy influenciada por las condiciones operativas, especialmente la relación entre la biomasa y el aire (Frg) y la temperatura de reacción. Un aumento en Frg puede mejorar la producción de gas, pero también puede reducir la conversión de carbono, lo que aumenta la formación de alquitranes y carbono no reaccionado. Además, las altas temperaturas pueden generar altos costos operativos, ya que se requieren sistemas de control de temperatura eficientes para maximizar la conversión sin comprometer la calidad del gas.

En términos de costos, la gasificación de biomasa requiere una inversión inicial significativa en la infraestructura del gasificador, que incluye el sistema de alimentación de biomasa, el gasificador y los equipos de limpieza del gas. Los costos de operación también pueden ser elevados debido al mantenimiento de los sistemas de control de temperatura y limpieza del gas, especialmente si se usa una biomasa con un alto contenido de humedad o contaminantes como el cloro. No obstante, la eficiencia energética del gas de síntesis producido puede justificar estos

costos, especialmente cuando el gas se utiliza para generar electricidad o como combustible para vehículos.

Los tiempos de procesamiento pueden variar según el tipo de biomasa y las condiciones operativas del gasificador. En general, la gasificación requiere un tiempo de residencia del gas en el reactor que puede ser de varias horas para asegurar la conversión completa de la biomasa. A pesar de esto, el proceso de gasificación es generalmente más rápido que la incineración, ya que no requiere una combustión completa de la biomasa, sino que solo se convierte en gas mediante un proceso térmico controlado.

Pirólisis de Residuos Orgánicos

La pirólisis es un proceso termoquímico que descompone los residuos orgánicos a través de la exposición a altas temperaturas (300-800°C) en un ambiente sin oxígeno. Los residuos orgánicos se calientan en un reactor cerrado, lo que provoca que se descompongan en biochar, gases y líquidos (aceites). El biochar obtenido, que es un tipo de carbón vegetal, se puede utilizar como fertilizante natural, mejorando la calidad del suelo al aumentar su capacidad de retención de agua y nutrientes. Esta tecnología, aunque no elimina la humedad de forma directa como en el termo-compostaje, transforma los residuos de forma eficiente en productos útiles.

Características clave de la pirolisis:

- Se realiza en un entorno sin oxígeno (anaeróbico).
- Produce biocarbón, bioaceites y gases como productos principales.
- La temperatura de operación es generalmente más baja que en la gasificación.
- No genera un gas de síntesis (syngas) como en la gasificación, sino más bien una mezcla de gases ligeros.
- Se utiliza principalmente para la producción de bioaceites y biocarbón.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observa el proceso de pirólisis termoquímico que implica la descomposición de materiales orgánicos mediante calentamiento en ausencia de oxígeno. Durante este proceso, los residuos sólidos se convierten en tres tipos de productos: un residuo sólido llamado biochar o carbón biológico, un bioaceite o alquitranes líquidos, y una mezcla de gases compuesta principalmente de monóxido de carbono (CO), metano (CH₄),

dióxido de carbono (CO_2) y otros compuestos ligeros. Dependiendo de las condiciones del proceso, como la temperatura y la velocidad de calentamiento, se obtienen diferentes proporciones de estos productos.

Existen dos tipos principales de pirolisis: la pirolisis lenta, que se utiliza principalmente para la producción de carbón vegetal (biochar), y la pirolisis rápida, que favorece la formación de bioaceite. La pirolisis lenta se lleva a cabo a temperaturas relativamente bajas (300°C - 600°C) y con un calentamiento lento, lo que resulta en una mayor producción de sólidos. En cambio, la pirolisis rápida se realiza a temperaturas más altas (alrededor de 500°C) y con un calentamiento rápido, lo que favorece la formación de líquidos como los bioaceites, que tienen un alto contenido energético.

En cuanto a su aplicación en residuos orgánicos, la pirolisis es una opción eficaz para la conversión de biomasa o residuos orgánicos en productos útiles. Residuos como los restos de cultivos agrícolas, residuos forestales, residuos alimentarios y otros tipos de biomasa pueden ser tratados mediante pirolisis para producir energía renovable. Los productos generados durante el proceso pueden ser utilizados como fuentes de energía, como biogás y bioaceite, y el biochar puede ser aprovechado en la agricultura para mejorar la calidad del suelo o como agente de captura de carbono.

Las condiciones operativas en la pirolisis, como la temperatura, la velocidad de calentamiento y la presión, son factores determinantes en la cantidad y tipo de productos generados. La temperatura juega un papel clave: las temperaturas más altas favorecen la producción de líquidos y gases, mientras que las temperaturas más bajas resultan en la formación de más sólidos. Además, en la pirolisis rápida, el calentamiento rápido favorece la producción de bioaceite, mientras que, en la pirolisis lenta, un calentamiento más controlado favorece la formación de carbón biológico.

Sin embargo, la pirolisis también presenta desventajas. Uno de los principales desafíos son los costos operativos asociados al proceso, que incluyen la inversión inicial en equipos y el control de la temperatura. Además, aunque los productos generados son útiles, algunos, como los aceites pesados o el alquitrán, pueden ser productos no deseados que requieren tratamiento adicional. La eficiencia variable del proceso según el tipo de residuo también puede afectar la calidad y cantidad de los productos finales.

Hidrotermólisis

Petrović et al., (2024) estableció que la hidrotermólisis es un proceso termoquímico que utiliza agua a alta temperatura y presión para tratar residuos orgánicos, principalmente biomasa húmeda, sin la necesidad de secarla previamente. Es un proceso termoquímico que utiliza agua a alta temperatura y presión para tratar residuos orgánicos, principalmente biomasa húmeda, sin la necesidad de secarla previamente. Este proceso se realiza a temperaturas moderadas entre 180°C y 280°C y en condiciones de alta presión, lo que permite descomponer las estructuras complejas de los materiales orgánicos. A lo largo de la reacción, el agua actúa como medio de reacción, transformando los compuestos orgánicos en hidrochar, un material carbonoso denso en energía, útil para diversas aplicaciones, como la producción de energía, la mejora de suelos y la remediación de contaminantes en aguas residuales.

Una de las principales ventajas de la hidrotermólisis es que no requiere la secaración previa de la biomasa, lo que reduce significativamente los costos y el consumo energético en comparación con otros métodos como la pirolisis o la combustión. Además, el proceso no emite gases contaminantes, lo que lo convierte en una opción ecológica para tratar residuos orgánicos. El producto principal, el hidrochar, tiene una alta densidad energética y propiedades que lo hacen apto para su uso como combustible sólido, con un rendimiento superior al de la biomasa cruda. Además, el hidrochar puede utilizarse para mejorar suelos, aumentando la retención de agua y contribuyendo al secuestro de carbono, lo que tiene beneficios ambientales significativos.

Sin embargo, la hidrotermólisis presenta ciertas desventajas. El proceso genera agua de proceso (PW) que contiene compuestos orgánicos disueltos, los cuales pueden ser tóxicos o contaminantes. Esto requiere un tratamiento adicional del agua antes de su liberación al medio ambiente, lo que aumenta los costos operativos. Además, las condiciones operativas de la hidrotermólisis, que requieren presiones de hasta 65 bar, pueden ser costosas y representar un desafío en términos de diseño y mantenimiento de los equipos necesarios para mantener estas condiciones. La eficiencia del proceso también depende de factores como la temperatura, el tiempo de residencia y el tipo de biomasa utilizada, lo que requiere optimización constante.

La hidrotermólisis es una tecnología prometedora para la gestión de residuos orgánicos, especialmente aquellos que contienen altos niveles de humedad. Aunque enfrenta desafíos en términos de tratamiento del agua de proceso y las

condiciones operativas costosas, sus ventajas ambientales, como la reducción de emisiones de gases contaminantes y la posibilidad de generar productos valiosos como hidrochar para uso energético y remediación, la hacen una alternativa viable y sostenible frente a métodos tradicionales de manejo de residuos.

Reciclaje Enzimático

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** hace referencia al uso de enzimas para descomponer residuos orgánicos es un área de investigación emergente. Las enzimas ligninolíticas y otras enzimas específicas pueden descomponer la celulosa, hemicelulosa y otras biomoléculas complejas de los residuos orgánicos, transformándolos en bioproductos útiles como bioplásticos, biomasa o fertilizantes. El uso de enzimas en la gestión de residuos sólidos está emergiendo como una práctica sostenible para el reciclaje de materiales orgánicos e inorgánicos. Las enzimas, como las hidrolasas, lipasas, oxidoreductasas, oxigenasas y lacasas, tienen la capacidad de descomponer los residuos tóxicos en materiales biodegradables o no tóxicos (Janeeshma et al., 2024)

Estas enzimas catalizan reacciones que modifican las propiedades químicas y físicas de los desechos, promoviendo su biodegradación. El uso de enzimas en residuos alimentarios y textiles ha mostrado ser eficaz. Por ejemplo, la celulasa y la β -glucosidasa han sido utilizadas para convertir residuos de textiles y papel en productos útiles como glucosa y bioplásticos, lo que refuerza el valor de estos desechos y contribuye a una economía circular. Además, las enzimas pueden ser modificadas y mejoradas mediante ingeniería genética, lo que permite optimizar su rendimiento y adaptabilidad a diferentes tipos de residuos, aumentando su eficacia en procesos industriales a gran escala.

Este enfoque de biotransformación enzimática se presenta como una solución ecológica y eficiente, con el potencial de convertir residuos problemáticos en productos de valor, como biogás, bioetanol y bioplásticos. Aunque los costos asociados con las enzimas aún representan un desafío, especialmente para la industria a gran escala, las investigaciones actuales buscan reducir estos costos a través de la inmovilización de enzimas y el uso de nanotecnología para mejorar la estabilidad y la reutilización de las enzimas.

El uso de enzimas en el tratamiento de residuos sólidos representa una técnica revolucionaria y sostenible que facilita la conversión de desechos peligrosos en materiales no tóxicos, contribuyendo a la reducción de la contaminación y la

creación de productos de valor agregado. Diorio et al., (2003) en el estudio de la actividad enzimática encontraron que la degradación de residuos orgánicos por *Saccobolus saccoboloides* demuestra la capacidad de este hongo filamentosos, poco convencional en este tipo de aplicaciones, para degradar diferentes tipos de residuos sólidos. Este hongo fue cultivado en medio sintético y en presencia de residuos de césped, papel de filtro, cartón corrugado y otros materiales. La investigación se centró en la medición de la actividad de las enzimas carboximetilcelulasa (CMCasa), xilanasa y amilasa, que son fundamentales para la descomposición de los residuos orgánicos. Estas enzimas pueden ser aprovechadas de manera eficiente en la industria del reciclaje, especialmente para el reciclaje de residuos de papel y cartón. Su aplicación podría mejorar los procesos de biodegradación de estos materiales, reduciendo significativamente su volumen y favoreciendo su reutilización.

Biocircuitos Integrados de Energía y Fertilización (Bioeconomía Circular)

La bioeconomía circular es una estrategia integral que utiliza los residuos orgánicos no solo para la producción de biogás o compost, sino para la creación de circuitos cerrados de energía y fertilización. Este enfoque permite aprovechar los residuos de manera más eficiente, contribuyendo a una economía más sostenible. Un ejemplo clave de esta práctica es la utilización de residuos orgánicos en digestores anaeróbicos para generar biogás, mientras que el digestato, el subproducto del proceso de digestión anaeróbica puede ser empleado como fertilizante, cerrando el ciclo de producción y reutilización de recursos.

Ye et al., (2024) establecieron que la producción de biocombustibles ha atraído considerable atención, especialmente dada la creciente demanda mundial de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero que amenazan al planeta. Los residuos orgánicos alimentan los digestores anaeróbicos, que mediante procesos biológicos descomponen la materia orgánica y producen biogás, una fuente renovable de energía. Este biogás puede ser utilizado como fuente de energía para diversos procesos industriales o residenciales, contribuyendo significativamente a la reducción de la dependencia de combustibles fósiles. El digestato generado a partir de este proceso es un fertilizante rico en nutrientes, lo que permite su reutilización para cultivar más biomasa o cultivos energéticos.

Este tipo de biocircuito integrado es un avance significativo en la maximización del aprovechamiento de los residuos. Al integrar los procesos de producción de energía y fertilización, no solo se contribuye a la reducción de desechos, sino que se promueve una forma más eficiente de gestionar los recursos naturales. Además, el

uso de residuos orgánicos como fuente de energía y fertilizantes puede reducir la emisión de gases de efecto invernadero, contribuyendo a mitigar los efectos del cambio climático. Los biocircuitos integrados de energía y fertilización se alinean perfectamente con los principios de la bioeconomía circular, donde los residuos son considerados recursos valiosos que deben ser aprovechados en su totalidad.

La integración de sistemas de energía y fertilización dentro de la bioeconomía circular ofrece una solución innovadora para el manejo de residuos, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y económica. La maximización del uso de los residuos orgánicos, mediante la producción de biogás y la reutilización del digestato como fertilizante, puede ser clave en la transición hacia una economía más verde, menos dependiente de recursos no renovables y más eficiente en el uso de sus recursos naturales. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** presenta el ciclo completo de la producción de biocombustibles dentro de la bioeconomía circular, destacando cómo los residuos orgánicos pueden ser transformados en energía limpia, contribuyendo a la sostenibilidad tanto económica como ambiental.

En la fase de Conversión de Biomasa, se destacan varias tecnologías clave para transformar los residuos orgánicos en biocombustibles. La digestión anaeróbica es un proceso en el cual los microorganismos descomponen la biomasa en ausencia de oxígeno, generando principalmente biogás (metano). El procesamiento termquímico utiliza calor y presión para transformar la biomasa en productos como bioaceite, gas de síntesis y otros productos químicos. La fermentación convierte azúcares y compuestos orgánicos en líquidos como bioetanol, utilizando microorganismos. Finalmente, el sistema bioelectroquímico emplea microorganismos para generar electricidad o biocombustibles mediante celdas microbianas.

En cuanto a la Producción de Biomasa, el diagrama señala diversas fuentes de residuos orgánicos que se pueden utilizar para la conversión a biocombustibles. Los residuos agrícolas, como paja o cáscaras de frutas, constituyen una fuente importante. Los residuos animales, como estiércol, también son valiosos en este proceso. La biomasa microalgal, que incluye microalgas cultivadas, es una fuente prometedora debido a su alta productividad y capacidad de captura de CO₂. Además, los residuos alimentarios, los residuos textiles y los lodos de aguas residuales son utilizados en el ciclo, cada uno con su propio potencial de valorización energética.

En la fase de Producción de Biocombustibles, la biomasa convertida a través de los procesos mencionados genera biocombustibles como el biogás, biohidrógeno,

bioetanol, biometano y bioelectricidad. El biogás es principalmente metano producido por digestión anaeróbica, mientras que el biohidrógeno se obtiene mediante ciertos microorganismos. El bioetanol se genera a partir de la fermentación de materiales ricos en azúcar, y el biometano es un biocombustible derivado de residuos orgánicos. Finalmente, la bioelectricidad es generada a través de sistemas bioelectroquímicos, transformando la energía de la biomasa en electricidad utilizable.

En conjunto, esta nueva tecnología ofrece una visión integral del ciclo de la bioeconomía circular, demostrando cómo los residuos orgánicos pueden ser aprovechados de manera eficiente para la producción de biocombustibles y su posterior aplicación en diferentes sectores industriales. Este enfoque no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también impulsa una economía más verde y circular.

4.4. MANEJO DE RESIDUOS SOLIDOS ORGANICOS EN COLOMBIA

La gestión de residuos sólidos en Colombia cuenta con diferentes decretos y políticas públicas que buscan garantizar la disposición adecuada de los residuos, así como su aprovechamiento y reciclaje. Estas normativas son fundamentales para establecer las bases legales de la gestión de residuos en el país y orientar los esfuerzos hacia una gestión sostenible, que minimice el impacto ambiental y promueva el aprovechamiento de los recursos.

A nivel nacional, la Ley 99 de 1993, creada por el Congreso de Colombia, es una de las normativas clave en la gestión ambiental del país. Esta ley creó el Ministerio del Medio Ambiente y estableció el Sistema Nacional Ambiental (SINA), con el objetivo de ordenar la gestión de los recursos naturales y promover el desarrollo sostenible. Además, la Ley 142 de 1994 regula los servicios públicos domiciliarios, incluido el servicio de aseo, y establece las condiciones bajo las cuales se debe gestionar la recolección, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos en todo el territorio nacional. Estas leyes forman la base sobre la que se construyen las políticas y regulaciones actuales en materia de residuos sólidos.

El Decreto 838 de 2005 formalizó el uso de los rellenos sanitarios como la principal tecnología para la disposición final de los residuos sólidos municipales, reemplazando las antiguas prácticas de botaderos a cielo abierto. Esta medida buscó mejorar la gestión y la seguridad en el tratamiento de residuos. Sin embargo, con el tiempo se han identificado grandes desafíos asociados a los rellenos sanitarios, como la saturación de estos espacios y las emisiones de gases

contaminantes, lo que ha impulsado el desarrollo de nuevas estrategias de manejo de residuos.

El Decreto 2981 de 2013 del Presidente de la República de Colombia modificó parcialmente el Decreto 1713 de 2002 y se centró en la implementación de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) en el país. Este decreto establece las directrices para la implementación de dichos planes, especialmente en lo que respecta a la recolección, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos en Colombia. Además, se destacan las exigencias sobre la gestión de residuos en los municipios y la obligación de las entidades responsables de la gestión de residuos a cumplir con las normativas y asegurar la viabilidad técnica y económica de las iniciativas de manejo de residuos. Este decreto también impulsa el aprovechamiento de los residuos orgánicos, como el compostaje y la digestión anaerobia, como tecnologías clave para el tratamiento de residuos.

La Resolución 754 del 25 de noviembre de 2014 fue una de las normativas más importantes en la actualización de las estrategias para la gestión integral de residuos sólidos en Colombia. Esta resolución establece la metodología para la formulación, implementación, evaluación, seguimiento y actualización de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS). Su objetivo es promover un manejo más eficiente de los residuos, integrando aspectos como la separación en la fuente, el reciclaje y la valorización de los residuos orgánicos. En el marco de esta resolución, se hace énfasis en la importancia de establecer políticas locales de manejo de residuos sólidos y en la necesidad de contar con mecanismos de control y evaluación para asegurar el cumplimiento de los objetivos ambientales.

En Boyacá, se han implementado diversas políticas públicas relacionadas con la gestión de residuos sólidos, alineadas con las normativas nacionales. El Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) es una de las herramientas más importantes, tanto a nivel departamental como municipal. Este plan tiene como objetivo establecer las estrategias necesarias para la recolección, transporte, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos, promoviendo un manejo eficiente y la reducción de impactos ambientales. Sin embargo, en muchos municipios de Boyacá, la implementación de estos planes ha sido limitada por la falta de recursos técnicos y financieros, lo que dificulta el cumplimiento de las regulaciones y la ejecución efectiva de los proyectos de manejo de residuos.

El análisis de las políticas públicas actuales revela tanto oportunidades como limitaciones para la gestión de residuos en Colombia y Boyacá. Entre las oportunidades, destaca la creciente conciencia ambiental y el compromiso del

gobierno con el desarrollo de políticas de reciclaje y aprovechamiento de residuos, como se observa en la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos, que promueve la economía circular y la producción más limpia. A nivel regional, los municipios de Boyacá pueden beneficiarse de estos avances mediante la implementación de tecnologías de tratamiento y el fortalecimiento de sus capacidades técnicas para el manejo de residuos.

No obstante, las limitaciones persisten, principalmente en lo relacionado con la falta de infraestructura adecuada, la insuficiencia en los mecanismos de control y la escasa participación de la comunidad en las prácticas de reciclaje y separación de residuos. Además, la limitada capacidad de los rellenos sanitarios y la falta de inversiones en tecnologías emergentes, como la digestión anaerobia y el compostaje, constituyen barreras importantes para una gestión más sostenible y eficiente de los residuos sólidos en la región.

4.5. ESTUDIOS PREVIOS Y EXPERIENCIAS EN LA GESTIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS

Biorgánicos del Sur del Huila, integrado al servicio público de aseo, representa un modelo ejemplar en el aprovechamiento de residuos orgánicos con fines de producción de compost. Esta planta tiene un impacto ambiental positivo, ya que recibe y procesa los residuos orgánicos generados por nueve municipios del sur del Huila. El abono orgánico resultante contribuye a la recuperación de suelos degradados por monocultivos, reduce la cantidad de residuos destinados a disposición final y ayuda a mitigar la emisión de gases de efecto invernadero.

La ciudad de Bogotá implementó una de Planta de Termovalorización, similar a la que se implementa en Ciudad de México siendo la primera en hacerlo en Colombia y la segunda en América Latina. Esta tecnología descompone residuos inorgánicos mediante calor, generando bajas emisiones de CO₂ y transformando la basura en energía, lo que la convierte en una alternativa ambientalmente favorable. Ubicada en el Parque de Innovación Doña Juana, la planta procesará entre 2.400 y 3.000 toneladas diarias de residuos, generando más de 128 megavatios de energía, suficientes para iluminar Bogotá o abastecer más de 40.000 hogares. Además, las cenizas resultantes serán aprovechadas como insumo en la industria de la construcción.

El relleno sanitario Doña Juana utiliza el biogás generado por la descomposición de residuos para producir energía eléctrica, lo que convierte a la planta Biogás Doña Juana en el caso más representativo de esta tecnología en el país y fue la primera

en generar energía para el Sistema Interconectado Nacional. además, recibió el Premio de Eficiencia Energética de Andesco en 2021. Entre septiembre de 2019 y diciembre de 2021, logró reducir 6.949.288 toneladas de CO₂ (UAESP, 2022). Esta iniciativa privada es un ejemplo destacado de cómo aprovechar el biogás en rellenos sanitarios para la generación sostenible de energía.

La política de residuos de la Unión implemento diversos planes de acción ambiental y un sólido marco legislativo. Su principal objetivo ha sido minimizar los efectos adversos sobre el medio ambiente y la salud humana, al tiempo que se promueve una economía más eficiente en el uso de la energía y los recursos naturales. Como parte de los esfuerzos implementados, se estableció la jerarquía de gestión de residuos, un enfoque de cinco niveles que prioriza la prevención como la estrategia más favorable, seguida de la reutilización, el reciclaje, formas de recuperación, y finalmente como último recurso la disposición en vertederos (Carvajal Romero et al., 2022).

5. METODOLOGÍA

La metodología se estructuró en tres fases:

Para la primera fase se elaboró una recopilación y análisis de datos sobre la generación de residuos sólidos generados mensualmente y la proyección poblacional de cada municipio, esto con el propósito de construir modelos matemáticos retrospectivos y prospectivos que permitan estimar la cantidad de residuos generados para cada uno de los municipios analizados.

La segunda fase se desarrolla mediante un análisis físico y químico de muestras de residuos orgánicos de cada municipio, con el objetivo de caracterizar su composición y determinar parámetros clave como el contenido de humedad, el peso específico, el tamaño de partícula, así como la presencia de elementos esenciales como carbono, nitrógeno, fósforo y potasio.

En la tercera fase, se establecen las estrategias para el aprovechamiento y tratamiento de los residuos sólidos orgánicos en cada municipio, basadas en los resultados obtenidos durante el análisis físico y químico de las muestras recolectadas.

FASE 1: IDENTIFICAR Y ANALIZAR DATOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS DE RETROSPECTIVA Y PROSPECTIVA

Analizar la generación de residuos en cada municipio:

Recopilar y analizar los datos sobre la cantidad de residuos generados mensualmente por los municipios de Sáchica, Arcabuco y El Cocuy en el Parque Ecológico y Tecnológico de Pírgua, abarcando el periodo de 2012 a 2024. Para completar los datos faltantes, se utilizarán los reportes proporcionados por el Sistema Único de Información de Servicios Públicos Domiciliarios (SUI).

- Revisar los datos disponibles sobre la generación de residuos orgánicos, obtenidos de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) de los municipios de Sáchica, El Cocuy y Arcabuco.
- Analizar los registros históricos de residuos para identificar tendencias de crecimiento o disminución a lo largo del tiempo.

- Revisar las proyecciones poblacionales de los municipios, tomando en cuenta los datos históricos y las proyecciones demográficas de las fuentes oficiales.
- Analizar la relación entre el crecimiento poblacional y el aumento de residuos generados para poder proyectar modelos futuros.

Construir los modelos matemáticos de retrospectiva y prospectiva

- Obtener datos de generación mensual de residuos (Ton) y población de los municipios (Sáchica, Arcabuco, El Cocuy) entre 2012 y 2024.
- Obtener datos de PPC (kg/hab/día) y consultar los PGIRS y el SUI.
- Determinar los valores mínimos, máximos y promedio anual de residuos generados.
- Calcular PPC y ajustar según la población de cada municipio.
- Utilizar el Régimen de Adecuación Sanitaria (RAS) para estimar valores de referencia y adecuación sanitaria.
- Utilizar Microsoft Excel para crear un modelo de regresión lineal simple o múltiple.
- Comparar el modelo con datos históricos para validar su precisión y ajustar los coeficientes si es necesario.
- Realizar proyecciones de residuos (2025-2035) usando el modelo validado y ajustado.
- Analizar las tendencias de residuos generados y su relación con el crecimiento poblacional.

Analizar las Series Temporales y Construcción del Modelo Matemático:

- Analizar las tendencias de la generación mensual de residuos a lo largo del tiempo.
- Calcular promedios anuales de generación de residuos para cada municipio.
- Utilizar los promedios anuales para construir un modelo de regresión lineal en Microsoft Excel.
- Incluir las proyecciones poblacionales anuales de cada municipio para proyectar la generación de residuos.
- Emplear el modelo para proyectar la generación mensual de residuos sólidos hasta el año 2036.
- Validar el modelo con los datos históricos.

Calcular la producción Per Cápit (PPC) ajustada con modelos de prospectiva

- Usar la generación proyectada de residuos para la estimación de la PPC, que representa la cantidad de residuos generados por habitante, se realiza utilizando la siguiente fórmula:

$$Ppc = \frac{Kg}{Hab - dia} \quad (1)$$

- Ajustar la PPC con los modelos prospectivos, y aplicar las proyecciones poblacionales anuales hasta el año 2036.
- Multiplicar la PPC obtenida por las proyecciones de población de cada año, para estimar cómo cambiará la PPC en función del crecimiento poblacional.
- Comparar los valores de PPC calculados con los datos del Régimen de Adecuación Sanitaria (RAS), Título F, para verificar la adecuación del cálculo de PPC frente a las normativas.
- Proyectar la generación de residuos a 2036

FASE 2: CARACTERIZAR LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS.

Recolectar las muestras.

- Las muestras fueron tomadas directamente desde el carro compactador de residuos a la entrada del relleno sanitario.

Analizar el contenido de humedad en los residuos orgánicos.

- Tomar una muestra representativa de residuos orgánicos de cada municipio (Sáchica, El Cocuy, Arcabuco).
- Triturar las muestras y homogenizarlas para que las partículas tengan un tamaño uniforme.
- Dividir las muestras en dos fracciones y colocarlas por separado en planchas para asegurar una distribución uniforme.
- Llevar las muestras al horno a **105°C** y dejarlas secar durante **24 horas**.
- Pasado el tiempo de secado, pesar nuevamente las muestras para obtener su peso en seco.
- Calcular la humedad utilizando la siguiente fórmula:

La humedad se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\omega = \left[\left(\frac{W_M - W_S}{W_M} \right) \right] * 100 \quad (2)$$

Donde:

ω = Humedad (%)

W_M = Peso de la muestra (Kg)

W_S = Peso de la muestra después de secarse a 105 °C (Kg)

La humedad de la muestra se expresa como un porcentaje que representa la cantidad de agua perdida durante el proceso de secado. Este valor es crucial para determinar la aptitud de los residuos orgánicos para su manejo y tratamiento en procesos como compostaje o digestión anaerobia.

Determinar la composición química de los residuos orgánicos.

- Seleccionar los métodos de caracterización de residuos orgánicos dentro de Phyllis2
- Ingresar los datos obtenidos del análisis de humedad (fase anterior) en la calculadora Phyllis2.
- Recopilar la información de Phyllis2 para los datos químicos.
- Triturar los residuos hasta obtener partículas pequeñas. Luego, tamizar las muestras utilizando un tamiz #20 para obtener una muestra más homogénea.
- Realizar el análisis utilizando la pistola XRF para identificar y cuantificar los metales y otros elementos clave presentes en las muestras.
- Repetir el análisis dos veces por cada muestra para obtener resultados más precisos y confiables.

FASE 3: DETERMINAR LAS ESTRATEGIAS DE TRATAMIENTO Y APROVECHAMIENTO.

Establecer las estrategias de tratamiento y aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos.

- Identificar las características relevantes de los residuos para determinar las necesidades específicas de tratamiento.

- Evaluar la viabilidad de aplicar el proceso de compostaje, Digestión anaerobia, valorización energética o bioproductos para transformar los residuos orgánicos en abono, biogás, fertilizantes en función de las variables físicas y químicas.

MATERIALES, EQUIPOS E INSUMOS

Entre los materiales empleados se incluyen bolsas de basura, peinilla, gafas, guantes, botas de seguridad, bata, y bandejas. Los equipos utilizados fueron el horno para el secado de las muestras, el molino para triturar los residuos, el tamiz para obtener una muestra homogénea y la pistola XRF para realizar el análisis de fluorescencia de rayos X. Los residuos sólidos recolectados incluyeron residuos orgánicos e inorgánicos provenientes de diferentes fuentes, como hogares y establecimientos, para asegurar una muestra representativa y diversa para el análisis.

Tabla 3. Materiales.

Materiales	Equipos	Residuos Sólidos
Bolsas de basura	Horno	Residuos orgánicos
Peinilla	Molino	
Gafas	Tamiz	
Guantes	Pistola FRX	
Botas de seguridad		
Bata		
Bandejas		

Fuente: Autor.

VARIABLES DEPENDIENTES E INDEPENDIENTES

Las variables de estudio se clasificaron en:

Variables Independientes:

- Composición de los residuos
- O rigen (comercial, domestico, industrial)

Variables Dependientes:

- Humedad de los residuos orgánicos.
- Composición elemental de los residuos.

ANÁLISIS DE DATOS

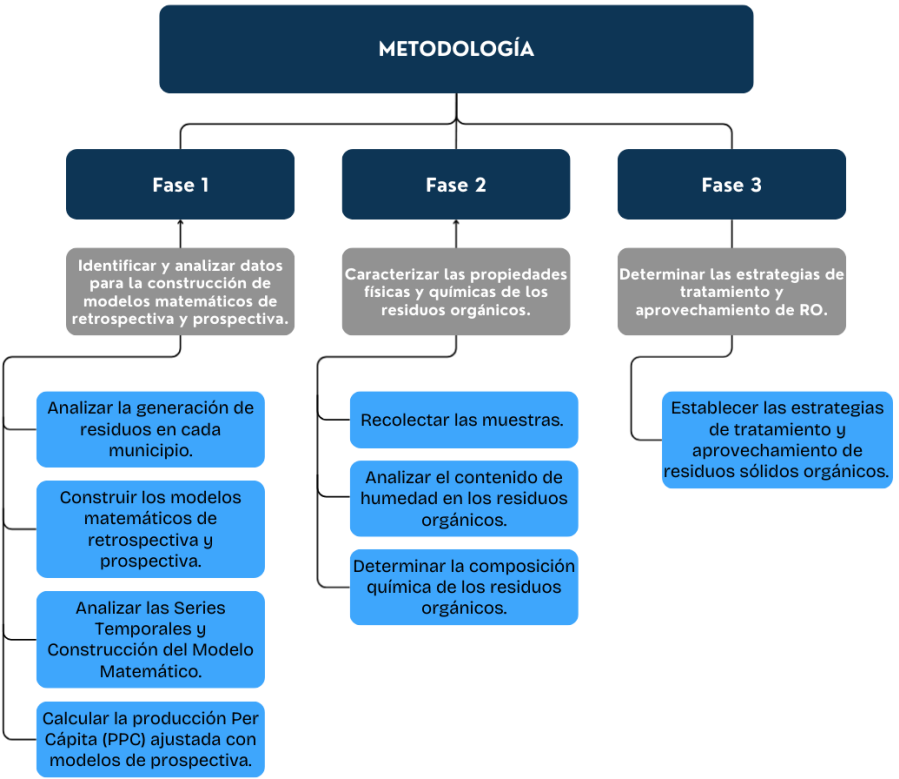
El análisis de datos se llevará a cabo utilizando estadísticas descriptivas para obtener promedios de humedad, composición elemental de los residuos y los resultados obtenidos de cada alternativa de tratamiento aplicada. Esta técnica permitirá resumir de manera clara y concisa los principales parámetros de las muestras, facilitando la interpretación de los datos.

Posteriormente, se realizará un análisis comparativo entre los resultados de las diferentes alternativas de tratamiento evaluadas. Este análisis tiene como objetivo identificar la opción más eficaz en términos de reducción del volumen de residuos y el aprovechamiento. Al comparar las alternativas, se podrán tomar decisiones informadas sobre cuál de los tratamientos ofrece los mayores beneficios en cada contexto.

Finalmente, se emplearán los modelos matemáticos desarrollados en fases anteriores para realizar proyecciones prospectivas. Estos modelos permitirán estimar la evolución futura de la generación de residuos y su manejo en los próximos años. Las proyecciones servirán para planificar estrategias de tratamiento a largo plazo y optimizar la gestión de residuos en los municipios estudiados.

A continuación, en la Ilustración 1 se presenta de forma resumida la metodología utilizada en el presente trabajo.

Ilustración 1. Metodología.



Fuente: Autor.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. RESULTADOS.

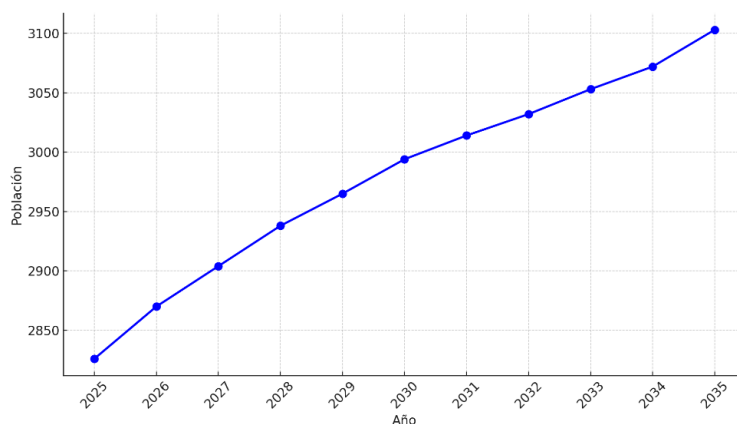
6.1.1 FASE 1: RECOPIRAR Y ANALIZAR DATOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS DE RETROSPECTIVA Y PROSPECTIVA

Análisis de la generación de residuos en cada municipio.

Municipio de Arcabuco

Según la Alcaldía Municipal de Arcabuco (2025), en el documento PGIRS se estableció que la proyección de la población de Arcabuco entre 2025 y 2035 muestra un crecimiento constante, aunque moderado, a lo largo de los años. De 2025 a 2035, según Figura 1 se estima que la población aumentará en aproximadamente 277 personas, lo que refleja una tasa de crecimiento anual aproximada de 1.8%. Este crecimiento, aunque no acelerado, sugiere una estabilidad en la expansión demográfica del municipio. La ligera tendencia ascendente también podría ser indicativa de mejoras en las condiciones de vida o la atracción de nuevos habitantes debido a factores socioeconómicos locales. Sin embargo, es fundamental tener en cuenta que este tipo de proyecciones no considera eventos imprevistos, como migración masiva o cambios en las políticas públicas que puedan influir en el crecimiento poblacional de manera más significativa.

Figura 1. Proyección de la población de Arcabuco.

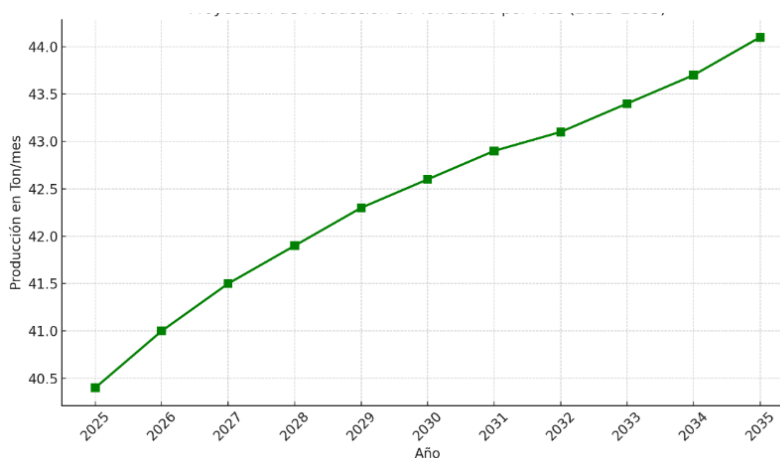


Fuente: Autor.

Proyecciones de la producción de residuos sólidos en el área urbana.

El análisis de las proyecciones de generación de residuos sólidos en el área urbana, según los datos del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS), indica una tendencia al alza en la producción mensual de residuos. Para el año 2035, se estima que la producción alcanzará las 44,1 toneladas como se muestra en Figura 2, lo que representa un incremento aproximado del 9 % en comparación con las estimaciones de 2025 (Alcaldía de Arcabuco, 2025).

Figura 2. Proyección de la generación de residuos en Arcabuco.



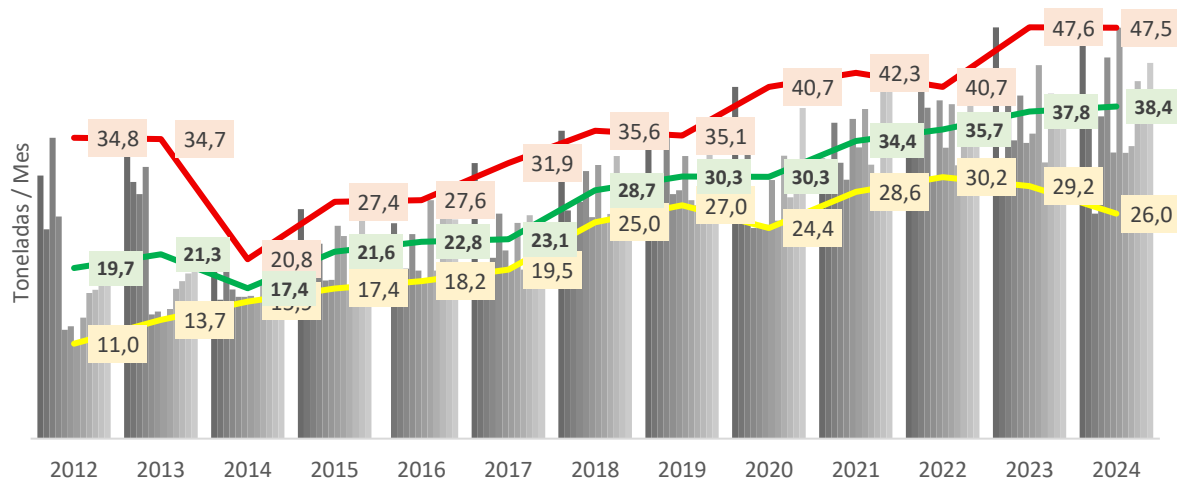
Fuente. Consultoría PGIRS, 2025.

Los porcentajes de residuos generados por cada sector evidencian variaciones en la proporción de residuos orgánicos y aprovechables, como se muestra en el gráfico correspondiente. En el ámbito residencial, el 39 % de los residuos son aprovechables y el 46 % corresponde a residuos orgánicos. En el sector comercial, los residuos aprovechables alcanzan el 51 %, mientras que los orgánicos representan el 44 %. Por su parte, el sector institucional presenta la mayor proporción de residuos aprovechables con un 61 %, y una menor generación de residuos orgánicos, que se sitúa en el 35 %. Estos datos reflejan una mayor presencia de residuos valorizables en todos los sectores analizados, siendo particularmente significativa en el sector institucional, donde la fracción orgánica es considerablemente inferior en comparación con los otros sectores (Alcaldía de Arcabuco, 2025).

El municipio de Arcabuco Figura 3 muestra fluctuaciones significativas en la producción mensual de residuos sólidos entre 2012 y 2024. En general, se observa

un aumento constante en la producción de residuos, especialmente a partir de 2020, donde las cifras comenzaron a superar las 30 toneladas por mes, alcanzando un promedio de 37.8 toneladas mensuales en 2023. En términos de valores extremos, los mínimos y máximos anuales también muestran variaciones notables. El mínimo más bajo de la serie se registró en diciembre de 2012 con 11 toneladas, mientras que el máximo se alcanzó en diciembre de 2024 con 47.6 toneladas. Estos extremos evidencian que la producción de residuos no solo depende de factores demográficos, sino también de otros factores como las actividades comerciales o eventos locales que podrían haber influido en los picos de producción.

Figura 3. Generación de residuos sólidos en el municipio de Arcabuco para el periodo de 2012 - 2024.



Fuente: Autor.

El promedio mensual de residuos sólidos ha mostrado un crecimiento sostenido, con un aumento de 19.7 toneladas por mes en 2012 a 38.4 toneladas por mes en 2024. Este incremento refleja un aumento en la urbanización, el consumo o ambos, lo que se traduce en una mayor generación de residuos.

Desde 2012 hasta 2024, la población de Arcabuco experimentó un incremento del 24%, mientras que la producción de residuos sólidos creció en un 94.92%. Este aumento en la producción de residuos es mucho mayor al crecimiento poblacional, lo que sugiere que el 70% adicional de este incremento no se debe a la mayor cantidad de habitantes, sino a otros factores como cambios en los hábitos de consumo, los sectores económicos y comerciales y las dinámicas sociales. Estos factores podrían incluir el aumento de actividades comerciales, cambios en los

patrones de consumo, una mayor producción de bienes y servicios, así como una posible disminución en las prácticas de reciclaje o reutilización.

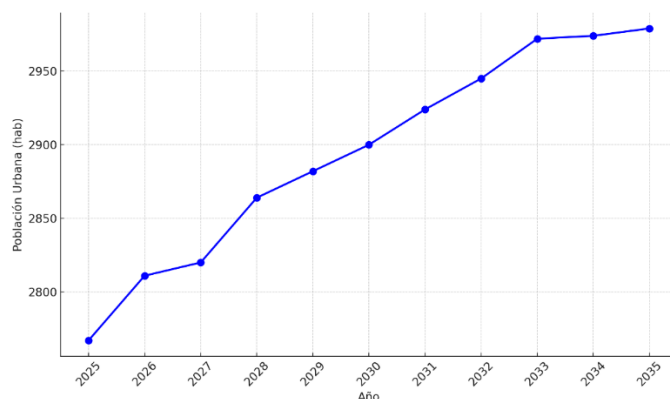
Este análisis subraya la necesidad de adaptar las estrategias de gestión de residuos para abordar estos cambios en los hábitos y las dinámicas sociales, que están impulsando un crecimiento desproporcionado de la producción de residuos en comparación con el crecimiento demográfico. Las políticas de reducción de residuos, promoción del reciclaje y gestión eficiente de los residuos deberán ser una prioridad para enfrentar estos desafíos de manera efectiva.

Municipio de El Cocuy.

Proyección de la población en el área urbana.

En la Figura 4 de la proyección de la población urbana de El Cocuy entre 2025 y 2035 muestra un crecimiento constante en la población, con un aumento de aproximadamente 212 habitantes en el período de 10 años. La población pasaría de 2,767 en 2025 a 2,979 en 2035, lo que implica un incremento moderado. Este crecimiento, que es más notorio a partir de 2028, podría ser indicativo de una mayor urbanización o un aumento en la migración hacia El Cocuy, debido a posibles mejoras en infraestructura o nuevas oportunidades económicas.

Figura 4. Proyección de la población de El Cocuy.



Fuente: Autor.

El Cocuy muestra un comportamiento demográfico diferente. Aunque inicia con la población más alta en 2005 (2.292 habitantes), su crecimiento ha sido lento y casi

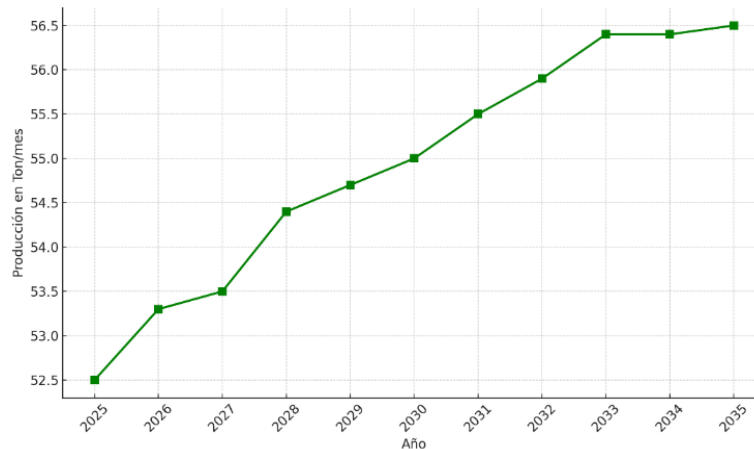
estancado. Para 2035 se proyectan 2.708 habitantes, lo que representa un incremento de apenas 416 personas en 30 años (un aumento del 18,1%). Durante varios años, entre 2011 y 2020, la población incluso mostró una tendencia a la estabilización o leve descenso. Este patrón puede deberse a factores como migración, envejecimiento poblacional o cambios en las dinámicas económicas locales. Desde el punto de vista del tratamiento de residuos, esta estabilidad poblacional representa una ventaja para el diseño de sistemas sostenibles, ya que la demanda no se incrementará abruptamente, permitiendo mantener y optimizar tecnologías ya instaladas, como compostaje comunitario o plantas piloto de biogás, sin requerimientos significativos de expansión.

Proyecciones de la producción de residuos sólidos en el área urbana.

La Figura 5 de la proyección de la producción en toneladas por mes entre 2025 y 2035 muestra un aumento progresivo y constante en la producción a lo largo de los años. Desde un valor de 52.5 toneladas en 2025, la producción aumenta gradualmente hasta alcanzar las 56.5 toneladas en 2035, lo que representa un crecimiento de 4 toneladas a lo largo de los 10 años. Este aumento anual refleja una tasa de crecimiento moderada, con un incremento que varía entre 0.2 a 0.4 toneladas por año.

Este tipo de crecimiento sugiere una tendencia de estabilización, donde la producción incrementa de manera controlada, lo que podría ser el resultado de mejoras graduales en los procesos de producción, o una respuesta a un aumento sostenido en la demanda. El patrón en el gráfico es bastante estable, sin fluctuaciones abruptas, lo que indica una proyección confiable en términos de capacidad de producción para el periodo analizado. Esta desaceleración podría estar relacionada con la implementación de estrategias de reducción, separación en la fuente o cambios en la dinámica poblacional. En general, la proyección destaca la necesidad de fortalecer la planificación y la infraestructura de manejo de residuos en el área urbana para responder de manera adecuada al aumento sostenido y progresivo de su generación.

Figura 5. Proyección de la generación de residuos en El Cocuy.

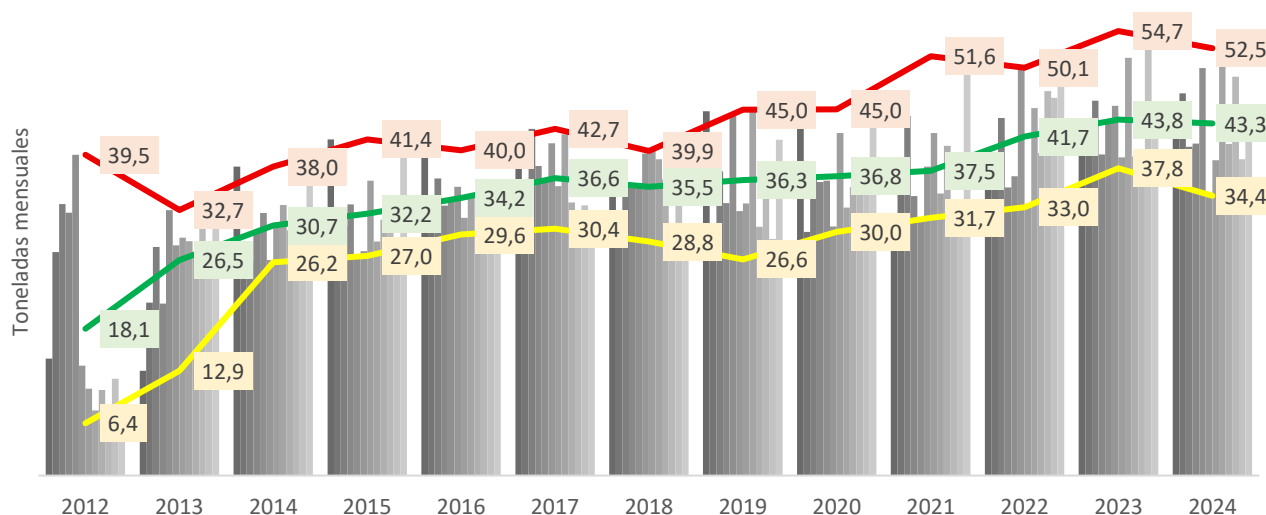


Fuente: Autor.

A partir de la tabla presentada, se estima la proyección de residuos sólidos generados en el área urbana del municipio de El Cocuy. El análisis indica que, si se mantiene la tendencia de crecimiento poblacional urbano durante la próxima década, la generación mensual de residuos podría alcanzar aproximadamente 56,5 toneladas mensuales. Esto representaría un incremento cercano al 8 % en comparación con los niveles actuales de producción. Cabe señalar que este cálculo incorpora un ajuste del 10 % correspondiente a la población flotante mensual dentro del área urbana (Alcaldía de El Cocuy, 2025).

Los datos para El Cocuy muestran un aumento en la producción de residuos sólidos a lo largo de los años, con fluctuaciones mensuales, pero una tendencia creciente en los valores anuales. Desde 2012 hasta 2024, la producción promedio mensual de residuos ha pasado de 18.1 toneladas a 43.3 toneladas, lo que representa un incremento del 139% en la producción de residuos. Este aumento es considerablemente mayor al crecimiento de la población, que ha sido del 9% en el mismo período. Este desajuste indica que, aunque la población ha crecido, el aumento en la producción de residuos se debe principalmente a factores como cambios en los hábitos de consumo, la urbanización y la expansión de sectores productivos en el municipio.

Figura 6. Generación de residuos sólidos en el municipio de Arcabuco para el periodo de 2012 - 2024.



Fuente: Autor.

El análisis de los mínimos y máximos anuales muestra que los valores de residuos oscilan significativamente durante el año, con picos en los meses de mayo y diciembre, donde se alcanzan producciones superiores a 50 toneladas. Este comportamiento estacional sugiere que ciertos eventos o actividades comerciales podrían estar contribuyendo a estos aumentos. De este modo, el incremento de la producción de residuos en El Cocuy no solo se debe al aumento de la población, sino que está muy influenciado por las dinámicas sociales, económicas y el comportamiento de consumo, lo que requiere una planificación adecuada en la gestión de residuos para enfrentar estos desafíos de forma efectiva.

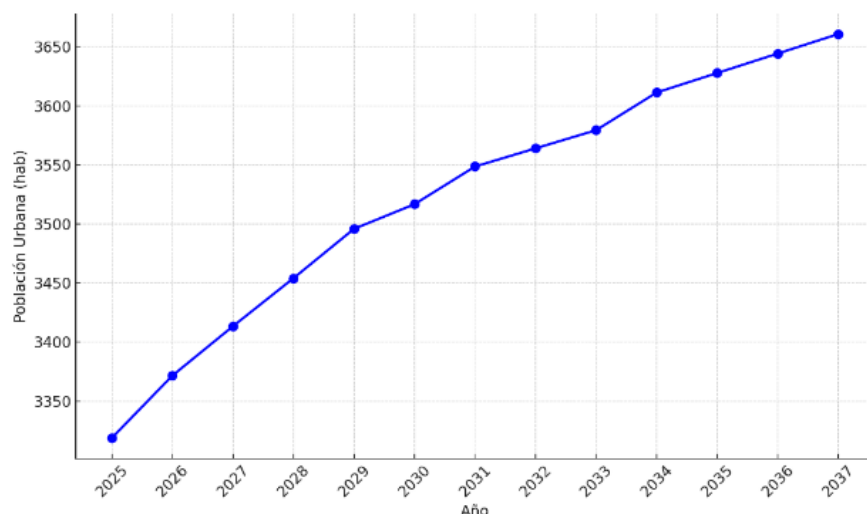
Municipio de Sáchica

Proyección de la población en el área urbana.

Sáchica muestra un crecimiento poblacional continuo y sostenido entre 2005 y 2035 como se muestra en la Figura 7. En 2005 contaba con 1.909 habitantes, y se proyecta que en 2035 alcanzará los 3.298 habitantes, lo que representa un aumento de aproximadamente 1.389 personas en 30 años (un incremento del 72,8%). Este comportamiento refleja una tendencia positiva constante, con incrementos anuales que oscilan entre 40 y 60 personas en los últimos años. Este crecimiento sostenido tiene importantes implicaciones para la gestión de residuos sólidos, ya que la generación per cápita, si se mantiene estable, derivará en un aumento proporcional

del volumen de residuos orgánicos. Además, este patrón sugiere la necesidad de fortalecer infraestructuras y programas de aprovechamiento como compostaje, digestión anaerobia y planes de recolección diferenciada.

Figura 7. Proyección de la población de Sáchica.

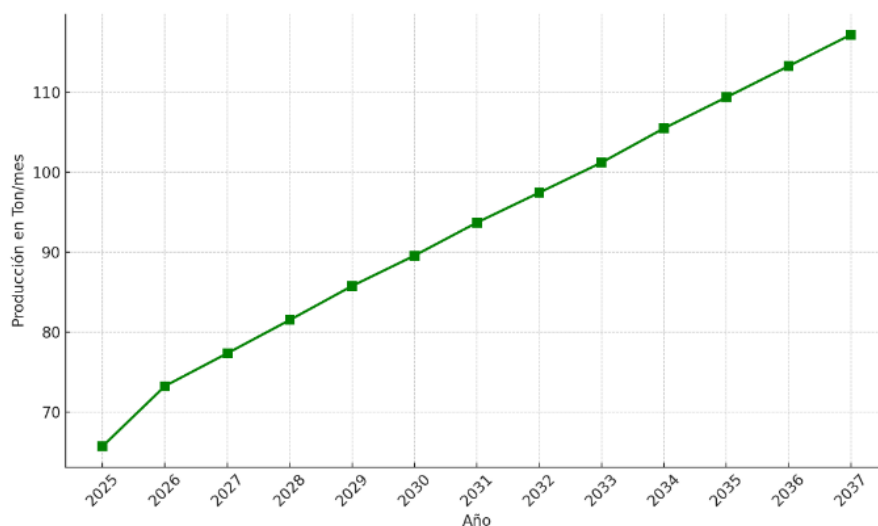


Fuente: Autor.

Proyecciones de la producción de residuos sólidos en el área urbana.

Entre los años 2025 y 2035, la generación mensual de residuos sólidos en el área urbana muestra un crecimiento considerable como se muestra en la Figura 8, pasando de aproximadamente 65,71 toneladas a 109,38 toneladas, lo que representa un incremento cercano al 66,5 % en una década. Este aumento no se debe únicamente al crecimiento poblacional proyectado, sino que está fuertemente influenciado por la presencia constante de población flotante, la cual contribuye de forma significativa a la carga total de residuos. La combinación de estos factores demanda una expansión progresiva y urgente de la capacidad de gestión urbana, que incluya mejoras en los sistemas de recolección, transporte y tratamiento final, con el fin de evitar la sobresaturación de la infraestructura existente y reducir los impactos ambientales derivados del aumento sostenido en la generación de residuos (Alcaldía de Sáchica., 2025).

Figura 8. Proyección de la generación de residuos en Sáchica.



Fuente: Autor.

A partir de las proyecciones sobre la generación de residuos sólidos en el área urbana, se estima que para el año 2037 la producción mensual alcanzará aproximadamente 117 toneladas, lo que representa un incremento cercano a 29 toneladas mensuales respecto a los valores esperados para el año 2025. Este aumento corresponde a un crecimiento estimado del 56 %, lo cual pone en evidencia la necesidad de ajustar y ampliar la capacidad operativa del sistema de gestión de residuos, considerando tanto el aumento poblacional como otros factores asociados a la actividad urbana.

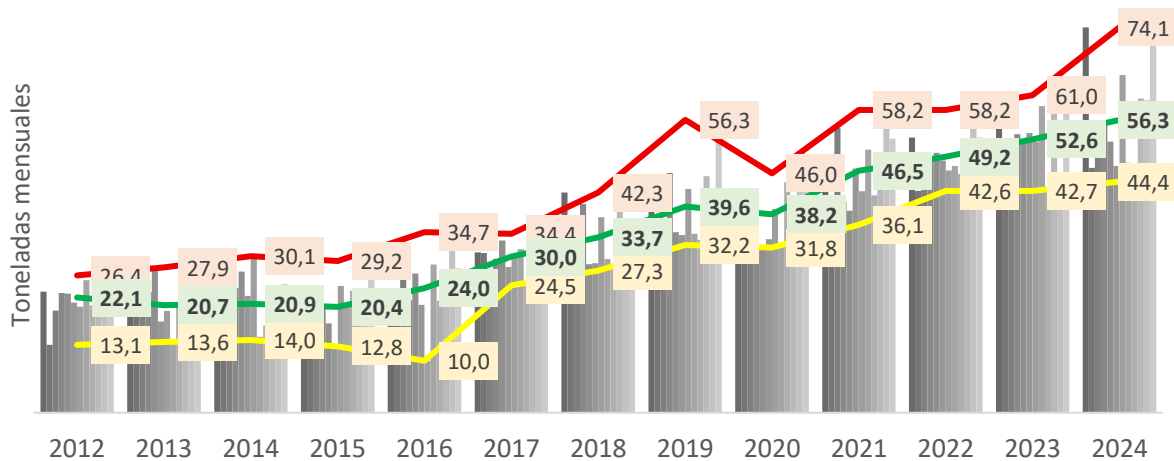
En cuanto a la composición de los residuos sólidos, se observan patrones comunes y diferencias significativas entre los sectores residencial, comercial e institucional, reflejando las particularidades de cada tipo de actividad. En promedio, los residuos orgánicos, principalmente restos de alimentos, constituyen el 41 % del total, con una presencia especialmente alta en los sectores residencial y comercial, donde alcanzan el 47 % y 48 %, respectivamente. Este comportamiento evidencia el fuerte impacto que tiene la generación doméstica y de servicios sobre la producción de materia biodegradable. Los plásticos, con una proporción promedio del 17 %, mantienen una presencia homogénea en los tres sectores, lo que subraya su importancia dentro de la fracción reciclable y la necesidad de una gestión diferenciada en los procesos de recolección y valorización.

Por su parte, el papel presenta una notable variabilidad: en el sector institucional alcanza un 23 %, frente a apenas un 7 % en los sectores residencial y comercial, lo

que refleja el peso de actividades administrativas y el uso documental intensivo en entornos institucionales. Materiales como cartón y vidrio se mantienen relativamente constantes, con proporciones entre el 8 % y el 9 %, asociadas al uso generalizado de embalajes y envases en todos los sectores analizados. Los residuos sanitarios se sitúan de forma estable en torno al 5 %, mientras que fracciones menores como residuos de poda y chatarra no ferrosa, aunque poco representativas en términos porcentuales, están presentes en todos los sectores, añadiendo diversidad a la composición global. Este desglose sectorizado resulta clave para el diseño de estrategias de manejo diferenciadas y más efectivas, que respondan de manera específica a las dinámicas y necesidades de cada sector productivo, optimizando así los procesos de reciclaje, reducción y aprovechamiento de residuos.

La Figura 9 muestra los datos para Sachica en donde se presenta un aumento progresivo en la producción de residuos sólidos entre 2012 y 2024. En este período, el promedio mensual de producción pasó de 22.1 toneladas en 2012 a 56.3 toneladas en 2024, lo que representa un incremento de 154.3% en la producción de residuos. Este aumento en la cantidad de residuos no solo se debe al crecimiento de la población, sino que también refleja otros factores como el cambio en los hábitos de consumo y las dinámicas sociales y económicas en la región.

Figura 9. Generación de residuos sólidos en el municipio de Arcabuco para el periodo de 2012 - 2024.



Fuente: Autor.

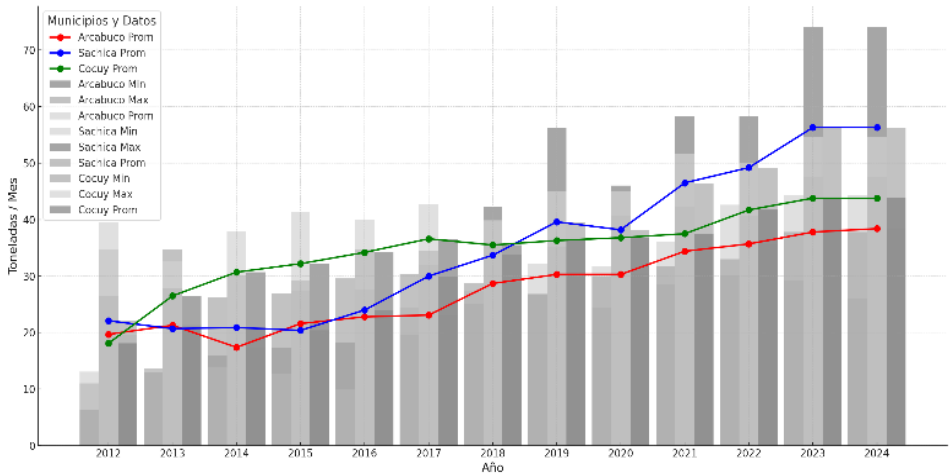
Si se considera que la población creció un 33% durante este período, la producción de residuos ha aumentado mucho más que el crecimiento poblacional. Este incremento superior en la producción de residuos, del 154.3%, sugiere que el

121.3% adicional se debe a factores externos al crecimiento demográfico. Estos factores incluyen el aumento de la actividad comercial, cambios en el consumo de bienes y servicios, o una menor tasa de reciclaje. También se observa que en 2024, los picos máximos de producción, especialmente en noviembre y diciembre, alcanzaron valores cercanos a 74 toneladas, lo que refuerza la idea de que existen ciertos períodos del año, probablemente asociados a actividades comerciales o festivas, que generan un aumento significativo de residuos. Este análisis resalta la necesidad de implementar políticas más eficientes de gestión de residuos que consideren no solo el crecimiento poblacional, sino también estos cambios en las dinámicas de consumo.

Generación mensual multianual de residuos sólidos de los tres municipios.

La Figura 10 muestra el análisis de los datos refleja un aumento general en el caso de Arcabuco existe una tendencia creciente, alcanzando un máximo en 2023 con 47.6 Ton / mes. Los valores de SÁCHICA también siguen una tendencia ascendente, destacando en 2024 con una diferencia notable en los valores máximos de 74.1 Ton /mes en comparación con años anteriores. En cuanto a El Cocuy, se observa un patrón similar, donde los valores máximos y promedio aumentan considerablemente hacia 2024, con un total de 56.3 ton/mes.

Figura 10. Generación mensual multianual de residuos sólidos de los tres municipios.



Fuente: elaboración propia (2025).

Se observa que, los valores promedio tienden a aumentar con el tiempo, lo que refleja un crecimiento en la generación de residuos en estos municipios. Arcabuco muestra una ligera fluctuación en sus valores máximos, pero mantiene un promedio

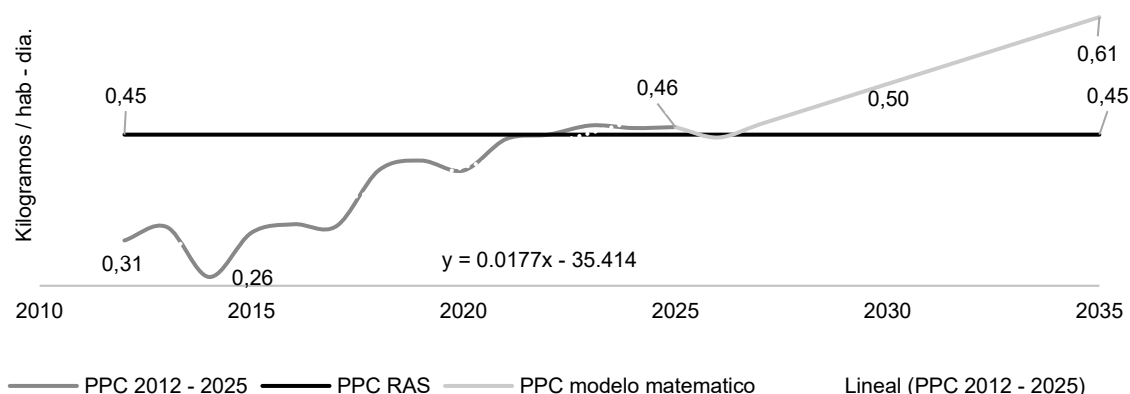
creciente en los últimos años. Sáchica y El Cocuy, por su parte, presentan un crecimiento sostenido en sus valores máximos y promedios, con un aumento notable en los últimos años, especialmente en Sáchica, que tiene un incremento significativo hacia entre 2022 a 2024. Este comportamiento podría estar relacionado con factores como el crecimiento poblacional, cambios en los hábitos de consumo y crecimiento urbanístico.

Análisis de series temporales y construcción del modelo matemático.

Municipio de Arcabuco

El análisis de la Producción Per Cápita (PPC) de Arcabuco desde 2012 hasta 2024 muestra una evolución gradual en la generación de residuos sólidos, la cual se presenta en la Figura 11, comenzando con un valor de 0.31 kilogramos por habitante al día en 2012 y alcanzando 0.46 kg/hab-día en 2024. A lo largo de este periodo, se observa un crecimiento sostenido, con un aumento notable a partir de 2018, cuando la PPC alcanza 0.40 kg/hab-día. Este crecimiento puede atribuirse a diversos factores, como el cambio en los hábitos de consumo, el crecimiento demográfico, crecimiento urbano (Guerra & Baca-Cajas, 2022). Sin embargo, a pesar de este crecimiento, la PPC de Arcabuco sigue por debajo del valor promedio de 0.45 kg / hab – día propuesto por el RAS, lo que indica que la generación de residuos en el municipio se encuentra dentro de un rango adecuado en comparación con los valores normativos.

Figura 11. Modelo matemático para el cálculo de la PPC - municipio de Arcabuco.

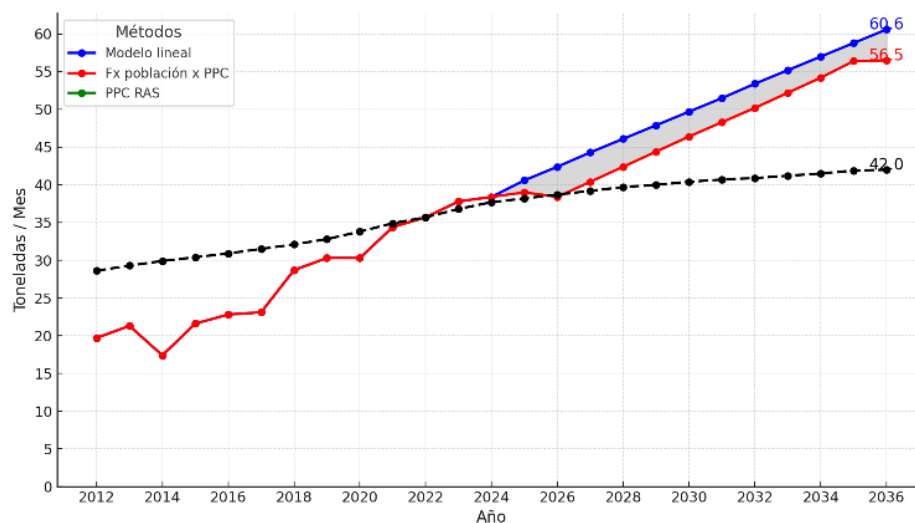


Fuente: Autor.

Para proyectar la PPC de Arcabuco a partir de 2025, se utilizó un modelo matemático basado en regresión lineal, ya que este proporciona predicciones promedio de las fluctuaciones ajustándose de manera más real a la tendencia sobre los datos históricos de PPC entre 2012 y 2024, donde se obtuvo el modelo de retrospectiva $PPC = 0.0177 t - 35,414$, donde t , representa el tiempo medido en años. Este modelo estima que la PPC seguirá aumentando de manera gradual, alcanzando 0.61 kg/ hab - día para 2036. A pesar de que la PPC proyectada supera el valor del RAS en los años futuros, con una diferencia de 0.16 kg /hab – día lo que significa que para una población proyectada de 3103 habitantes a 2036 la diferencia en la generación de residuos es de 14.89 ton /mes, cantidad que afecta la economía y los costos de la prestación del servicio de aseo en el municipio.

El análisis de la generación de residuos sólidos en Arcabuco presentado en la Figura 12, se realizó utilizando los tres métodos (modelo lineal, Fx población x PPC y PPC RAS) revela que, a lo largo de los años, la proyección de residuos sigue una tendencia creciente en todos los métodos, pero con diferencias importantes. A partir de los datos proporcionados, podemos observar que el modelo lineal y el método de Fx población x PPC, a partir de 2024, presentan proyecciones más cercanas entre sí, con un aumento gradual en la generación de residuos, alcanzando 60.6 toneladas por mes en 2036 y 56.5 toneladas por mes es decir los dos modelos presentan una diferencia cercana a 4.1 toneladas por mes. Mientras que con respecto al RAS la diferencia oscila entre 14.5 y 18.6 toneladas por mes.

Figura 12. Generación de residuos en el municipio de Arcabuco (2012 - 2036).



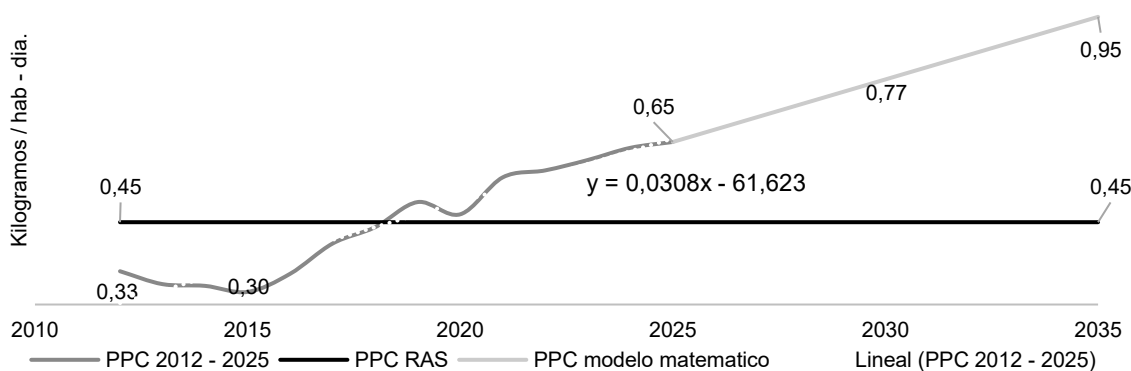
Fuente: Autor.

Municipio de Sáchica

El método de PPC RAS, se basa en un valor fijo de 0.45 kg/hab-día, y no refleja de manera precisa el comportamiento observado en los datos de Arcabuco de los análisis de retrospectiva. Aunque el RAS ofrece un valor normativo útil para estandarizar las estimaciones de residuos, la diferencia con los otros dos métodos resalta que, en la práctica, el valor constante del RAS no refleja adecuadamente las condiciones locales y las particularidades del municipio, como el crecimiento poblacional y los cambios en el consumo, que impactan directamente en la generación de residuos.

En el caso del municipio de Sáchica desde 2015 hasta 2024 se encuentra una tendencia creciente en la generación de residuos sólidos como se muestra en la Figura 13. En 2012, la PPC era de 0.33 kg/hab-día y en 2024 alcanzó 0.63 kg/hab-día. Este crecimiento puede ser explicado por diversos factores, como el incremento poblacional y los cambios en los patrones de consumo, crecimiento urbano y actividades comerciales o turísticas (Gelvez Pabón, 2023), valor que a 2024 supera el valor promedio recomendado por el RAS, con estos datos se construyó el modelo $PPC = 0.0308 t - 61,623$, con el cual se realizó el análisis de proyección a 2036, donde t representa el tiempo medido en años. La actividad turística tiene una influencia significativa en el aumento de los residuos urbanos, llegando en muchos casos a duplicar la cantidad generada por un habitante local. Esta presión se intensifica debido a la estacionalidad del turismo, que produce incrementos abruptos en la demanda de servicios de recolección y tratamiento de residuos, lo que a su vez eleva de manera considerable los costos operativos del sistema de gestión (Alea González et al., 2019).

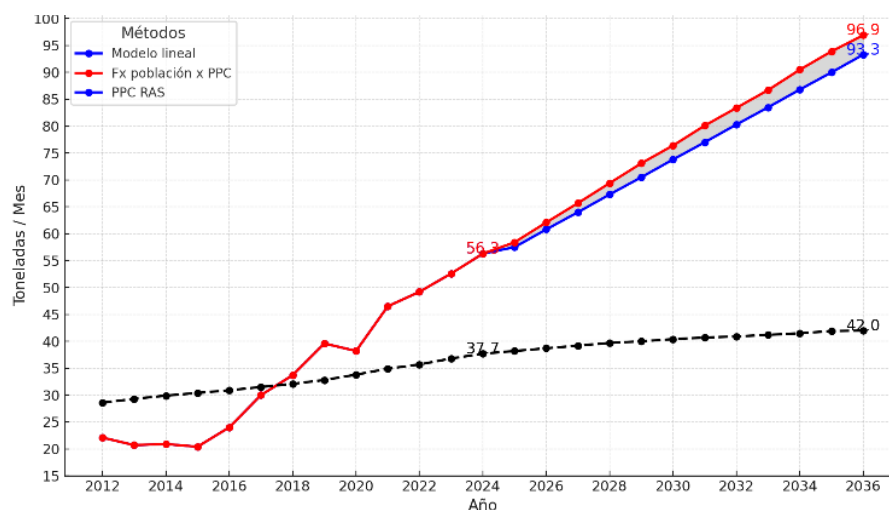
Figura 13. Modelo matemático para el cálculo de la PPC - municipio de Sáchica.



Fuente Autor.

La proyección en la generación de residuos sólidos en el municipio de Sáchica, con base en los tres métodos de proyección (modelo lineal, Fx población x PPC y PPC RAS), mostrados en la Figura 14 evidencia que la generación de residuos es creciente a medida que pasan los años. Los modelos de análisis de regresión lineal en la generación de residuos y el modelo de regresión de la PPC por la población siguen un patrón de crecimiento sostenido, alcanzando 96.9 toneladas por mes en 2036.

Figura 14. Generación de residuos en el municipio de Sáchica (2012 - 2036).



Fuente: Autor.

A pesar de que tanto el modelo de regresión lineal para la generación de residuos como el modelo de regresión de la PPC por la población, presentan resultados alineados, el método de proyección RAS, con su valor fijo de 0.45 kg/hab – día de PPC, muestra una proyección mucho más baja, alcanzando solo 42 toneladas por mes en 2036. Esto refleja una diferencia significativa de 54.9 toneladas / mes con respecto a los otros métodos, lo que sugiere que el uso de un valor estándar como el del PPC RAS no captura adecuadamente la realidad local de Sáchica y lo que es preocupante para el nivel municipal debido a que la producción en los próximos 12 años se puede duplicar con respecto al valor actual.

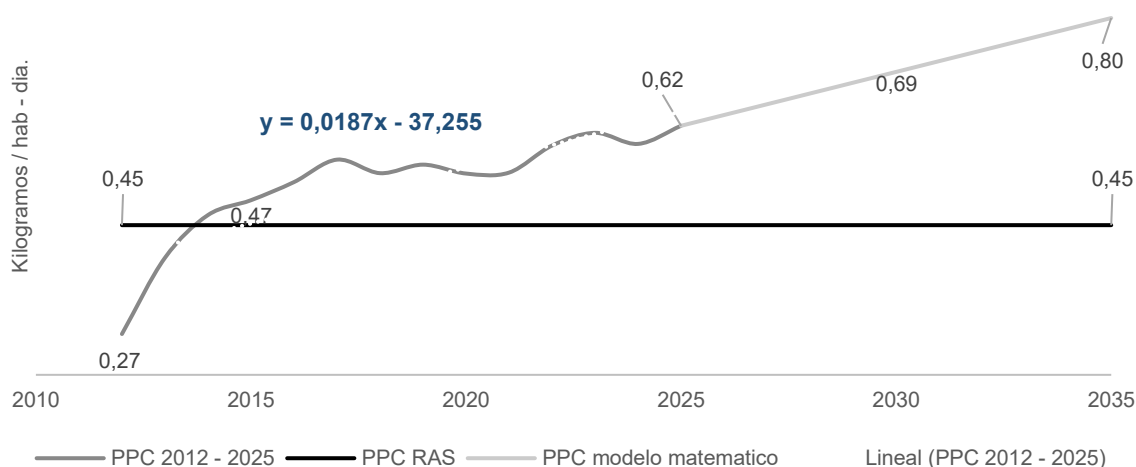
Por lo tanto, los modelos de regresión lineal para la generación de residuos como el modelo de regresión de la PPC por la población resultan ser más ajustados a la realidad de Sáchica, ya que tienen en cuenta el contexto local y el crecimiento proyectado en los próximos años.

Si bien es cierto que con los datos de 2012 a 2024 la PPC se duplicó en valores pasando de 0.33 a 0.65 kg/hab-día, se estima que la tendencia continuará aumentando, alcanzando 0.98 kg/hab-día para 2036. A pesar de que la PPC proyectada supera el valor del RAS en los años futuros, la diferencia es moderada, con un incremento de 0.53 kg/hab-día por habitante, incluso inferior al valor máximo de 0.75 kg/hab-día recomendado en la Tabla F.1.1. del título F del RAS. Esto demuestra la importancia de los modelos de análisis de series de datos mensuales multianuales en retrospectiva para la estimación de datos esenciales en la generación de residuos sólidos.

Municipio de El Cocuy

El análisis retrospectivo de la PPC en El Cocuy, desde 2012 hasta 2024, muestra un aumento gradual en la generación de residuos, pasando de 0.27 kg/hab - día en 2012 a 0.59 kg/hab-día en 2024 como se presenta en la Figura 15. Este comportamiento refleja un crecimiento constante en la cantidad de residuos generados, lo cual está intrínsecamente relacionado con los factores de desarrollo turístico del municipio, más que por los factores de incremento poblacional (Díaz Fariña et al., 2020). Con los datos del análisis retrospectivo se encontró el modelo lineal $PPC = 0.0187 t - 37,255$ el cual se usó para la proyección de 2025 a 2036, donde t representa el tiempo medido en años.

Figura 15. Modelo matemático para el cálculo de la PPC - municipio de El Cocuy.



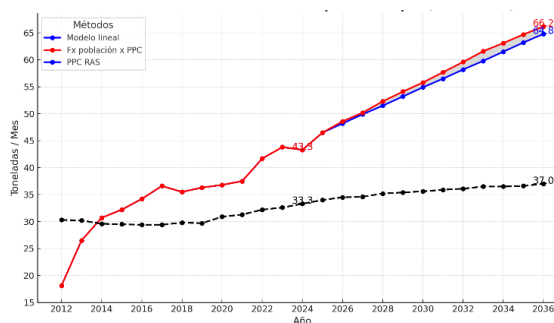
Fuente: Autor.

Con los datos del análisis prospectivo, se estima que, a partir de 2025, la generación de residuos continuará su aumento, pasando de 0.62 kg/hab-día en 2025 a 0.80 kg/hab-día en 2036. Esta proyección indica que la PPC superará en 0.35 kg/hab-día el valor promedio del RAS. Esta diferencia tiene un impacto considerable en los costos operativos y en la gestión del servicio de aseo, lo que resalta la necesidad urgente de desarrollar estrategias de gestión de aprovechamiento a nivel municipal. Por esta razón, adoptar un modelo sustentado en los principios de la economía circular no solo contribuiría a disminuir la cantidad de residuos enviados a los rellenos sanitarios, sino que también abriría nuevas oportunidades para el desarrollo económico (Monroy Ávila & Díaz Guevara, 2025). Es crucial tener en cuenta la distancia considerable del municipio a los rellenos sanitarios, ya que este factor contribuye directamente al incremento de los costos asociados al transporte de los residuos (Morais et al., 2021).

El método por la PPC del RAS, muestra una proyección significativamente más baja, alcanzando solo 37.0 toneladas por mes en 2036. La diferencia de 29.2 toneladas por mes entre la proyección del PPC RAS y los otros dos métodos resaltan una brecha importante en la estimación de la generación de residuos. El valor fijo de 0.45 kg/hab - día del PPC RAS no demuestra la realidad local de El Cocuy, donde los factores como el crecimiento poblacional y los cambios en las costumbres de consumo, el turismo y la incidencia de ser capital de la provincia inciden directamente en la cantidad de residuos generados (Arbulú et al., 2024).

De este modo se determina que tanto el modelo de regresión lineal para la generación de residuos como el modelo de regresión de la PPC por la población proporcionan proyecciones más ajustadas a la realidad de El Cocuy, ya que consideran factores anteriormente mencionados.

Figura 16. Generación de residuos en el municipio de El Cocuy (2012 - 2036).



Fuente: elaboración Propia (2025).

Cálculo de la producción per cápita (PPC) ajustada con modelos de prospectiva.

En la Figura 17, se presentan las proyecciones de la Producción Per Cápita (PPC) para los municipios de El Cocuy, Sáchica y Arcabuco desde 2012 hasta 2024, basadas en los datos de retrospectiva, mientras que el análisis entre 2025 y 2036 se basó en análisis de simulación matemática. A pesar de que los tres municipios comparten una tendencia general de crecimiento, cada uno muestra características propias en su ritmo de aumento.

En el caso de El Cocuy, se observa un incremento gradual y constante a lo largo del período, con un crecimiento más pronunciado hacia los años cercanos a 2030, lo que sugiere que este municipio podría estar enfrentando una aceleración en su generación de residuos, probablemente debido a factores como el crecimiento poblacional y el aumento de la actividad económica por el turismo del PNN EL COCUI (Sabater Vidal, 2022).

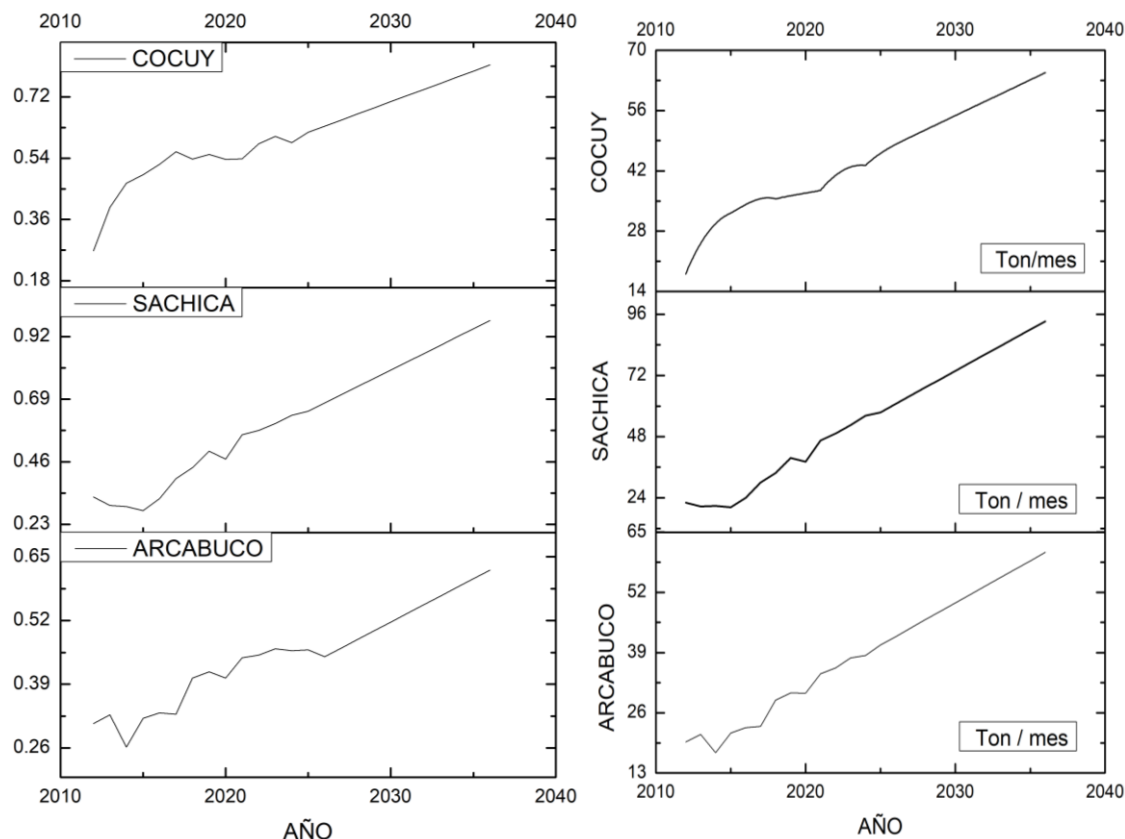
Por otro lado, Sáchica muestra una tendencia similar, pero con un crecimiento más fuerte en comparación con El Cocuy, destacándose por una mayor estabilidad en los primeros años, sin embargo, Sáchica es el que alcanza los valores más altos con incrementos de hasta el 46% del incremento de la PPC actual. En contraste, Arcabuco tiene la tasa de crecimiento más baja de los tres municipios, aunque igualmente muestra una tendencia creciente. El modelo de regresión lineal aplicado indica que, si bien Arcabuco mantiene un crecimiento más controlado, tanto El Cocuy como Sáchica están proyectando aumentos significativos en la generación de residuos a medida que se acercan a 2036.

Con los datos obtenidos se resalta la importancia de aplicar métodos de análisis retrospectivos específicos para cada municipio, ya que la determinación de la Producción Per Cápita (PPC) no se encuentra dentro de los rangos establecidos por el RAS. Aunque los tres municipios estudiados están clasificados en la sexta categoría, es crucial realizar un análisis particular para cada uno, ya que la PPC no solo está relacionada con el crecimiento poblacional, sino también con otros factores como los hábitos de consumo y la población flotante.

Este último factor es especialmente relevante, ya que refleja un dinamismo social elevado, difícil de cuantificar, como el impacto de festividades o el incremento de personas que llegan al municipio en busca de residencia o actividades de paso. Estos fenómenos, no siempre son considerados en estudios tradicionales y mucho

menos en la planificación de residuos sólidos a nivel municipal en los Planes de gestión Integral de Residuos Sólidos – PGIRS. A pesar de que los tres municipios siguen una tendencia creciente, la velocidad y magnitud del aumento varían significativamente, lo que implica que las políticas de gestión de residuos deben ser adaptadas de manera local para cada contexto territorial.

Figura 17. Proyecciones de la PPC y la generación de residuos sólidos.



Fuente: Autor.

El análisis de la generación de residuos sólidos en Arcabuco, SÁCHICA y El Cocuy muestra una tendencia creciente en todos los métodos utilizados, pero con diferencias significativas al ser comparadas entre sí y con el PPC del RAS. En Arcabuco, los modelos proyectan un aumento gradual hasta alcanzar 60.6 toneladas por mes en 2036, en SÁCHICA, se proyecta 96.9 toneladas por mes en 2036, mientras que, para El Cocuy, 66.2 toneladas por mes en 2036. Estas diferencias destacan la necesidad de utilizar modelos diferenciados en los cálculos de variables locales para cada municipio, ya que los factores sociales afectan directamente la generación de residuos, lo que no se refleja en los valores

establecidos en rangos del RAS, siendo los modelos matemáticos de retrospectiva los métodos más asertivos en este proceso de gestión integral de residuos sólidos muestra el análisis de retrospectiva y la proyección en una sola línea, de donde se observa que, en todos los municipios, se observa una tendencia creciente en la generación de residuos, con diferentes tasas de crecimiento y proyecciones a futuro.

En El Cocuy, la proyección muestra un incremento acelerado en la generación de residuos, alcanzando más de 56 toneladas por mes hacia 2036, lo que refleja un fuerte crecimiento impulsado por factores como el aumento poblacional y el desarrollo económico, lo que exigirá una adaptación para gestionar de manera eficiente los recursos y la infraestructura de manejo de residuos a nivel de local para lograr disminuir las tasas de disposición y aumentar la vida útil del relleno sanitario.

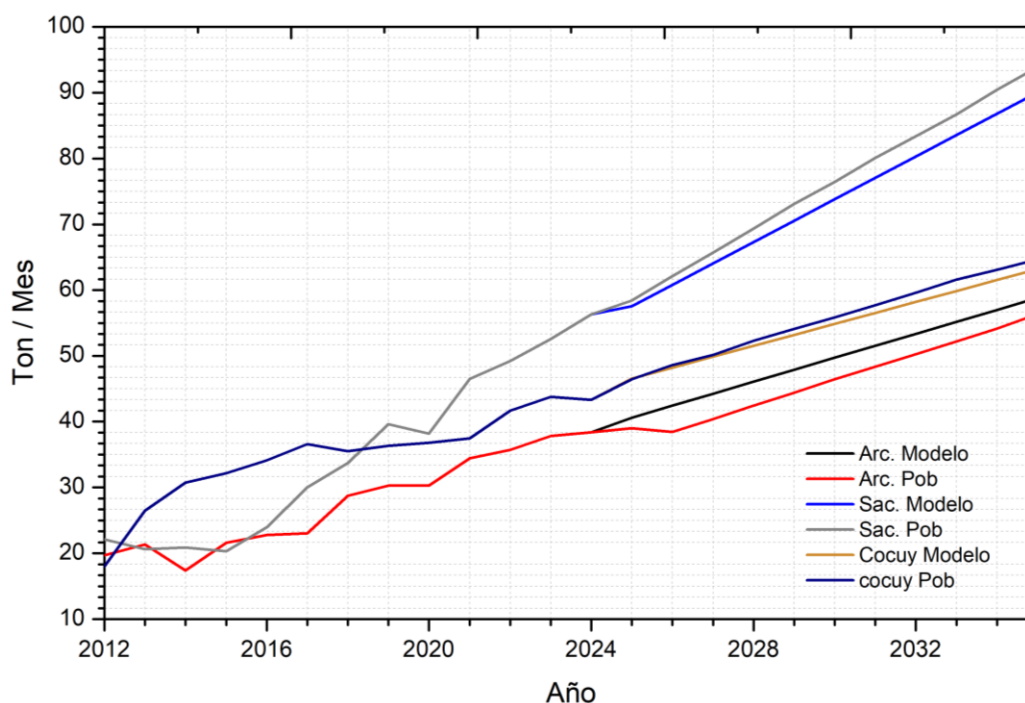
En Sáchica, el aumento es aún más pronunciado, con una proyección de 96 toneladas por mes en 2036, lo que resalta la necesidad urgente de implementar políticas de manejo de residuos específicas que se adapten al ritmo acelerado de generación, garantizando que la infraestructura del municipio pueda soportar este incremento sin comprometer la sostenibilidad económica de la empresa prestadora, además del reto que se tiene por las distancias desde el municipio al sitio de disposición. Por último, aunque Arcabuco muestra un crecimiento más moderado, con 52 toneladas por mes proyectadas para 2036, es esencial que también se anticipen a este aumento progresivo y ajusten sus políticas de gestión de residuos a su crecimiento poblacional y económico y aun sabiendo que los porcentajes de residuos sólidos orgánicos oscilan entre el 40% - 60% en la mayoría de los municipios, siendo este un reto que demanda de la implementación de modelos diferenciados de residuos orgánicos.

Finalmente, la Figura 18 muestra la proyección de la generación de residuos sólidos para los municipios de Arcabuco, Sáchica y El Cocuy, considerando dos enfoques: el modelo matemático construido con los datos 2012 – 2024 para la estimación en la generación de residuos, los cuales consideraron variables más dinámicas, lo que los hace más precisos para los contextos locales.

En comparación, el valor de referencia del PPC RAS, que se mantiene entre 0.3 y 0.75 kg/hab - día, podría subestimar la generación real de residuos, especialmente en contextos donde hay cambios poblacionales y en los patrones de consumo o se ven afectados por el turismo local. Esto resalta la importancia de utilizar modelos basados en datos reales y específicos de cada municipio para obtener estimaciones

más precisas, lo cual es esencial para planificar una gestión eficiente y sostenible de los residuos sólidos.

Figura 18: Proyecciones en la generación de residuos sólidos.



Fuente: Autor.

El modelo de retrospectiva basado en datos reales permite simular y analizar la generación de residuos a nivel municipal de manera más coherente y precisa, superando las limitaciones de los enfoques estándar como el PPC RAS. Sin embargo, es crucial destacar que Colombia ha tardado más de 15 años en consolidar datos adecuados, y, ante este contexto, tanto las nuevas normativas como el propio RAS deben evolucionar. Las proyecciones futuras deben basarse en análisis retrospectivos robustos que consideren las dinámicas locales, no en valores fijos que subestiman la complejidad del fenómeno. Es hora de que las políticas y normativas nacionales se adapten a la realidad del país, priorizando datos concretos y actualizados para una gestión de residuos realmente efectiva y sostenible.

6.1.2. FASE 2: CARACTERIZAR LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS.

ANÁLISIS DE HUMEDAD.

A continuación, en la Tabla 4 se presentan los resultados de las muestras en húmedo de cada municipio.

Tabla 4. resultados de los pesos en húmedo de las muestras de cada municipio.

Muestras	Arcabuco	El Cocuy	Sáchica
1			
Peso en húmedo	3,400 kg	3,337 kg	2,807 kg
2			
Peso en húmedo	3,119 kg	3,377 kg	2,432 kg

Fuente: Autor.

A continuación, en la Tabla 5 se presentan los resultados de las muestras en seco de cada municipio.

Tabla 5. Resultados de los pesos en seco de las muestras de cada municipio.

Muestras	Arcabuco	El Cocuy	Sáchica
1			
Peso en seco	0,840 kg	0,835 kg	0,697 kg
2			
Peso en seco	0,738 kg	0,856 kg	0,679 kg

Fuente: Autor.

De acuerdo con la ecuación (2) la humedad para cada municipio se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\omega = \left[\left(\frac{W_M - W_S}{W_M} \right) \right] * 100$$

Donde:

ω = Humedad (%)

W_M = Peso de la muestra (Kg)

W_S = Peso de la muestra después de secarse a 105 °C (Kg)

Con los datos anteriormente obtenidos se encuentra:

Como se observa en la Tabla 6 Arcabuco presentó el mayor porcentaje promedio de humedad con un valor de 75.82%, lo cual puede estar asociado a un mayor contenido de restos de frutas, verduras y otros residuos orgánicos frescos, característicos de una fracción putrescible más activa y reciente. El Cocuy tuvo un valor levemente inferior de 74.81%, indicando una composición de residuos también húmeda y probablemente similar en origen, con predominancia de materia orgánica fresca. Por su parte, Sáchica mostró el menor contenido de humedad con un valor 73.62%, lo que podría estar vinculado a una mayor proporción de residuos secos, como cáscaras, papel o restos vegetales parcialmente descompuestos o envejecidos. Estas diferencias en el contenido de humedad pueden influir directamente en la eficiencia de los procesos de tratamiento biológico, ya que niveles altos favorecen la digestión anaerobia, mientras que valores más bajos requieren ajustes en la mezcla para un compostaje óptimo.

Tabla 6. Porcentaje de humedad de cada municipio.

Muestras	Arcabuco	El Cocuy	Sáchica
1	75,29	74,98	75,17
2	76,34	74,65	72,08
Promedio W	75,82 %	74,81 %	73,62 %

Fuente: Autor

CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS.

La caracterización permitió conocer la composición elemental de los residuos, información fundamental para evaluar su potencial de aprovechamiento en procesos biológicos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

Arcabuco

El contenido promedio de carbono en las muestras fue de 9,70%, como se muestra en la Figura 30. Este es un valor adecuado para procesos biológicos como el compostaje y la digestión anaerobia. Este nivel de carbono indica una presencia significativa de materia orgánica fácilmente oxidable, lo cual favorece la actividad microbiana durante la descomposición aeróbica. Además, este nivel de carbono respalda una relación C/N favorable para la formación de ácidos grasos volátiles y

producción de metano en digestores anaerobios, lo cual refuerza la viabilidad del biogás como forma de tratamiento.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**Figura 25 **31** muestra que la presencia de hidrógeno en concentraciones superiores al 1% puede ser indicativa de una fracción orgánica activa y biodegradable, lo cual resulta favorable en procesos biológicos como el compostaje, la digestión anaerobia y la producción de bioabono. En estos contextos, el hidrógeno forma parte de la materia orgánica reducida, que puede ser transformada por microorganismos en compuestos más estables como humus, o en gases como metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Sin embargo, su aprovechamiento está condicionado por otros factores críticos, como la relación C/N, la humedad, el pH y la presencia de inhibidores, que influyen directamente en la actividad microbiana y la eficiencia del proceso.

La Figura 32 muestra que el contenido promedio de oxígeno fue de 6,50%, lo que refleja una alta proporción de compuestos oxigenados, típicos de residuos orgánicos vegetales y alimentarios. Este valor es favorable para el compostaje, ya que permite una buena degradación aerobia sin acumulación de lixiviados. No obstante, desde el punto de vista energético, un alto contenido de oxígeno tiende a reducir el poder calorífico de los residuos, ya que implica que parte del carbono está ya parcialmente oxidado

Respecto al nitrógeno en la Figura **33** se observó un promedio de 0,35%, lo cual representa un contenido moderadamente bajo. Este valor es adecuado para mantener la actividad microbiológica sin riesgo significativo de inhibición por amonio o amoníaco en procesos anaerobios. Además, este contenido nitrogenado complementa el carbono presente para establecer una relación C/N equilibrada, importante tanto en compostaje como en digestión.

El azufre se encuentra en concentraciones muy bajas Figura 34 con un promedio de 0,12%, lo cual es positivo tanto para la digestión anaerobia como para cualquier alternativa térmica. Un contenido bajo de azufre reduce la generación de sulfuro de hidrógeno (H_2S) en biodigestores, evitando la corrosión de equipos, los malos olores y la necesidad de tratamientos de desulfuración costosos. Así mismo, en procesos de combustión, minimiza la emisión de óxidos de azufre (SO_x), que son gases altamente contaminantes.

En términos energéticos, el valor promedio del poder calorífico neto (PCN) promedio fue de 1,95 MJ/kg, como se observa en la Figura **35** lo cual es bajo para tratamiento térmico directo como la combustión o incineración, pero adecuado para la digestión

anaerobia, que no depende directamente del contenido energético sino de la degradabilidad de la materia orgánica. Estos valores confirman que los residuos pueden producir biogás con eficiencia aceptable, aunque no son recomendables para procesos como la gasificación sin un acondicionamiento previo (mezcla con residuos secos o con mayor poder calorífico).

La Figura 36 muestra que los residuos analizados presentan un promedio de 98,78% en peso incluyendo haluros, lo que indica una composición altamente dominada por compuestos inorgánicos halogenados. Este alto contenido puede provenir de residuos domésticos, productos clorados, detergentes y materiales tratados químicamente. Desde el punto de vista técnico, los haluros no participan en procesos biológicos como el compostaje o la digestión anaerobia, y en altas concentraciones pueden inhibir la actividad microbiana. Además, en procesos térmicos pueden generar compuestos tóxicos como dioxinas.

Por su parte, el valor promedio del poder calorífico bruto (VPB) alcanzó 4,24 MJ/kg como se muestra en la Figura 37 lo cual es coherente con residuos orgánicos con alto contenido de humedad. Este nivel de energía bruta indica que, aunque los residuos contienen una fracción combustible, su bajo poder calórico útil limita su uso directo en procesos térmicos. Para mejorar su VPB sería necesario un proceso de secado previo o la mezcla con residuos de alta energía, como plásticos no reciclables o residuos de poda seca.

El valor promedio de HHV mine se muestra en la Figura 38 para los residuos orgánicos de Arcabuco es de 4,15 MJ/kg. Este nivel evidencia un potencial de valorización energética limitado, pero aprovechable con las estrategias tecnológicas adecuadas, como procesos de valorización térmica básica, como la gasificación de baja escala o la generación de calor para usos rurales o comunitarios.

La Figura 39 muestra la relación C/N promedio fue de 30,71, un valor que se encuentra ligeramente por encima del rango óptimo para compostaje (25:1 a 30:1), pero aún dentro de los límites tolerables para la digestión anaerobia. Esta proporción indica una ligera deficiencia de nitrógeno, lo que podría ralentizar el proceso biológico si no se ajusta con la adición de residuos nitrogenados. Sin embargo, este valor sigue siendo viable, y no representa un impedimento crítico, tanto para compostaje como para digestión anaerobia.

El Cocuy

Los residuos orgánicos de El Cocuy presentan un perfil químico equilibrado, que permite su aprovechamiento en diferentes procesos biológicos. Como se muestra en la Figura 40 contenido de carbono 10,11% se encuentra dentro de rangos adecuados para mantener una actividad microbiana sostenida. Este nivel facilita la oxidación de la materia orgánica en compostaje, permitiendo una generación constante de calor y una buena estructuración del sustrato. Además, en digestión anaerobia, asegura una carga orgánica estable que favorece la producción de biogás. En sistemas de codigestión, esta proporción puede ser complementada con residuos nitrogenados para alcanzar relaciones más eficientes según el tipo de proceso.

En la Figura 41 el hidrógeno presenta un promedio de 1,36% se alinea con el comportamiento típico de residuos frescos y fermentables, permitiendo una liberación energética controlada. En compostaje, este valor contribuye a reacciones exotérmicas que aumentan la temperatura de las pilas, acelerando la descomposición. En digestión anaerobia, favorece una buena conversión de los ácidos intermedios hacia metano. En digestión seca, ayuda a reducir la necesidad de gestión hídrica, ya que evita una humedad excesiva.

La Figura 42 muestra el promedio del oxígeno fue de 6,77%, como parte estructural de compuestos celulósicos, indica una buena proporción de materia lignocelulósica, que en compostaje aporta estructura y aireación, reduciendo la compactación y mejorando la porosidad de la mezcla. Este nivel también es compatible con la fermentación en digestores anaerobios y contribuye a la estabilidad del proceso, evitando acumulación de compuestos recalcitrantes. En lombricultura, este tipo de compuestos es asimilado lentamente, por lo que permite una transformación gradual hacia humus de calidad.

El valor promedio del nitrógeno fue de 0,37% como se muestra en la Figura 43 este se encuentra en niveles aceptables para procesos de tratamiento biológico. En compostaje, permite una actividad sostenida de los microorganismos, aunque su proporción, sin mezclas, podría limitar la velocidad de descomposición si no se ajusta con materiales más ricos en nitrógeno. En digestión anaerobia, este nivel es adecuado, ya que evita la acumulación de compuestos como el amoníaco, que pueden inhibir el proceso metanogénico. También es compatible con procesos como la digestión seca y la codigestión, donde puede equilibrarse fácilmente según

las características del sustrato complementario. En lombricultura, este contenido es viable, siempre que el alimento del sistema se mantenga diverso y equilibrado.

El promedio de azufre 0,13% se mantiene en niveles bajos como se muestra en la Figura 44, lo cual permite que los procesos biológicos se desarrollen sin alteraciones del pH o interrupciones en la actividad microbiana. En compostaje, este nivel evita alteraciones durante la mineralización de la materia orgánica. En digestión anaerobia, su presencia no genera efectos inhibidores y permite mantener una producción de biogás estable. En lombricultura y digestión seca, este valor no representa ninguna restricción y facilita una transformación limpia del residuo.

El valor promedio de haluros totales fue de 98,55% en los residuos orgánicos de El Cocuy no representa una limitación directa para procesos como el compostaje, la digestión anaerobia, la digestión seca o la bioestabilización, ya que no afecta significativamente la actividad microbiana ni la eficiencia del tratamiento. Sin embargo, en lombricultura, este nivel puede generar condiciones menos favorables para el desarrollo de las lombrices, por lo que se recomienda realizar una premezcla o un precompostaje previo.

Un PCN de 2,14 MJ/kg como se muestra en la Figura 46 indica un potencial energético moderado, suficiente para respaldar procesos como la digestión anaerobia en pequeña escala, aunque con una producción de biogás más limitada que la observada en residuos con mayor densidad energética. En compostaje, esta energía contribuye al incremento de temperatura durante la fase termofílica, favoreciendo la descomposición, aunque con menor intensidad que en residuos con mayor poder calorífico neto.

Como se muestra en la **Figura 47** este valor promedio de HHV4,44 MJ/kg estandarizado confirma una estabilidad energética aceptable en los residuos orgánicos de El Cocuy. Aunque no alcanza los niveles más altos, permite proyectar un rendimiento energético predecible en sistemas de tratamiento como la digestión seca o la codigestión controlada. Esta estabilidad energética también puede contribuir al diseño de estrategias integradas de valorización energética en contextos rurales o comunitarios.

Por otra parte, como se muestra en la Figura 48 la relación C/N de 30,54 se encuentra levemente por encima del rango óptimo para compostaje (25–30), lo que puede ralentizar ligeramente la descomposición inicial y reducir la temperatura máxima alcanzada en la pila, aunque sin impedir el desarrollo del proceso. La incorporación de materiales más ricos en nitrógeno puede corregir esta relación

fácilmente, acelerando la maduración del compost. En digestión anaerobia, esta relación es favorable, ya que mantiene un buen equilibrio sin riesgo de inhibición por amoníaco. En procesos de codigestión, esta proporción proporciona una base útil para complementar residuos más nitrogenados y mantener una digestión estable. Para lombricultura, si bien es un poco alta, no impide la actividad de las lombrices, siempre que se les proporcione un entorno balanceado con suficiente humedad y material fresco.

Sáchica.

Como se muestra en la Figura 49 el contenido de carbono 10,58% refleja una fracción orgánica suficientemente rica para sostener procesos de degradación aerobia como el compostaje, generando condiciones adecuadas para el desarrollo microbiano y el mantenimiento de la actividad metabólica. En digestión anaerobia y digestión seca, este nivel permite una carga orgánica estable y utilizable, mientras que en codigestión ofrece una base adecuada para mezclar con residuos de distinta composición.

El nitrógeno fue de 0,38% como se muestra en la Figura 50 este se encuentra dentro de un rango compatible con todos los tratamientos biológicos. En compostaje, sostiene el crecimiento microbiano y contribuye al desarrollo de una fase termofílica adecuada, especialmente si se controla la relación con el carbono. En digestión anaerobia, permite una producción estable de biogás sin riesgo de inhibición por amoníaco. En lombricultura y bioestabilización, este nivel es igualmente útil y seguro.

En la Figura 51 se muestra que valor promedio del hidrógeno fue de 1,43%, ligeramente superior al de otros municipios evaluados, sugiere un buen potencial energético y favorece la conversión bioquímica de los compuestos orgánicos. Este valor mejora el comportamiento termogénico en compostaje y aumenta la eficiencia en la producción de metano durante la digestión anaerobia. También aporta ventajas en digestión seca, al equilibrar la relación entre humedad, calor generado y estabilidad del proceso.

En la Figura 52 se muestra el contenido promedio de oxígeno 7,09% el cual está relacionado con la presencia de compuestos celulósicos y lignocelulósicos, aportando estructura al sustrato y mejorando la aireación en compostaje. Esta característica es útil también en lombricultura, donde se requiere una mezcla que no se compacte con facilidad. En digestión anaerobia, este nivel permite una

descomposición progresiva sin afectar la estabilidad del proceso, aunque puede ralentizar ligeramente la producción de biogás si no se complementa con residuos más fácilmente degradables.

El promedio de azufre fue de 0,11% como se muestra en la Figura 53 el cual que es adecuado para procesos como el compostaje, ya que favorece la actividad metabólica sin generar acumulaciones tóxicas. Sin embargo, si se combina con materiales ricos en nitrógeno, puede provocar la emisión de compuestos volátiles como el H_2S (sulfuro de hidrógeno), especialmente bajo condiciones anaerobias. En digestión anaerobia, este contenido de azufre es aceptable, pero debe vigilarse, ya que ciertos microorganismos reductores de sulfato pueden competir con los metanógenos, reduciendo la producción de biogás y generando olores desagradables.

El valor promedio de haluros totales fue de 98,67% como se muestra en la Figura 54, aunque elevado, no impide la ejecución de procesos como compostaje, digestión anaerobia, digestión seca o bioestabilización. En lombricultura, sin embargo, puede requerir una mezcla previa con materiales más suaves o un precompostaje, para evitar efectos adversos en las lombrices.

Este valor promedio de 2,36 MJ/kg en ek PCN de Sáchica es el más alto entre los municipios analizados como se muestra en la Figura 55, lo que indica un mejor aprovechamiento energético real del residuo. En procesos como la digestión anaerobia, este nivel favorece una mayor eficiencia en la generación de biogás. Aunque en el compostaje el PCN no es directamente aprovechado como energía, sí contribuye al aumento de temperatura durante la fase termofílica, lo que mejora la descomposición de la materia orgánica.

En la figura Figura 56 se muestra el valor promedio VPB 4,63 MJ/kg este refleja que el residuo posee una alta densidad energética, lo cual es especialmente importante si se considera una estrategia de codigestión con residuos de menor energía. En digestión anaerobia, esta energía potencial respalda una producción sostenida y elevada de biogás. En compostaje, un VPB alto también favorece el desarrollo térmico natural del proceso, acortando los ciclos de tratamiento y mejorando la higienización.

El valor promedio de HHV 4,53 MJ/kg registrado para Sáchica refleja una mayor estabilidad energética del residuo como se muestra en la Figura 57, lo cual mejora su comportamiento predecible en tratamientos como la digestión seca y la

codigestión, donde se espera mantener un rendimiento continuo. Este valor también permite modelar de forma más precisa el potencial energético del residuo en escenarios de valorización energética rural o de pequeña escala.

La relación C/N se muestra en la Figura 58 cual fue de 30,77 aunque ligeramente superior al rango ideal para compostaje, sigue siendo adecuada para el desarrollo del proceso, con un pequeño ajuste mediante residuos ricos en nitrógeno si se desea acelerar la descomposición. En digestión anaerobia, es una relación óptima que evita la acumulación de compuestos tóxicos. En digestión seca y codigestión ofrece flexibilidad para combinar distintos sustratos sin comprometer el equilibrio nutricional del sistema.

ANÁLISIS CON PISTOLA XRX.

La espectroscopía de fluorescencia de rayos X (XRF, por sus siglas en inglés). Según Díaz et al., (2024) esta facilita la identificación y cuantificación de múltiples elementos presentes en diferentes tipos de muestras sólidas, como polvos y materiales granulares. Con el fin de asegurar resultados precisos, la muestra debe cumplir con ciertos requisitos durante su preparación, tales como un espesor apropiado, una superficie nivelada, una composición homogénea y un tamaño de partícula constante como se muestra en la Figura 19 a,b.

Figura 19 a, b. Análisis con pistola XRF.

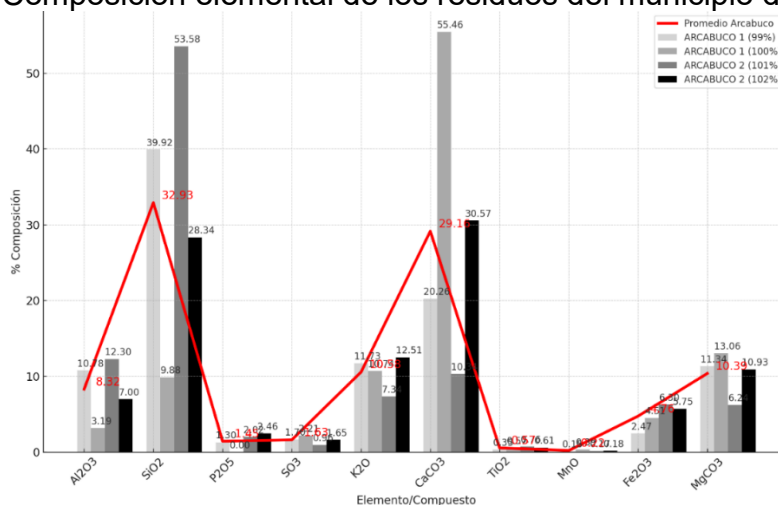


Fuente: Autor.

Elementos presentes es las muestras analizadas en el municipio de Arcabuco.

Arcabuco presenta una composición destacada en óxidos minerales como se muestra en la Figura 20, con valores muy altos de SiO_2 (32,93%), Al_2O_3 (8,32%) y Fe_2O_3 (4,76%), estos elementos no son nutrientes esenciales, pueden mejorar la estructura física del compost, actuando como estabilizantes y facilitando la aireación. Los contenidos de K_2O (10,58%), CaCO_3 (29,16%) y MgCO_3 (10,39%) son adecuados y confieren un perfil agronómico interesante para la producción de abonos con funciones correctivas y nutritivas. El fósforo (P_2O_5) está presente en un valor moderado (1,45%), superior al de los otros municipios, lo que representa una ventaja para su uso como fertilizante orgánico. Los bajos niveles de MnO y TiO_2 reducen riesgos de acumulación de metales no esenciales. En conjunto, los residuos de Arcabuco ofrecen buenas condiciones para el compostaje estructurado y estabilizado, con valor fertilizante moderado.

Figura 20. Composición elemental de los residuos del municipio de Arcabuco.



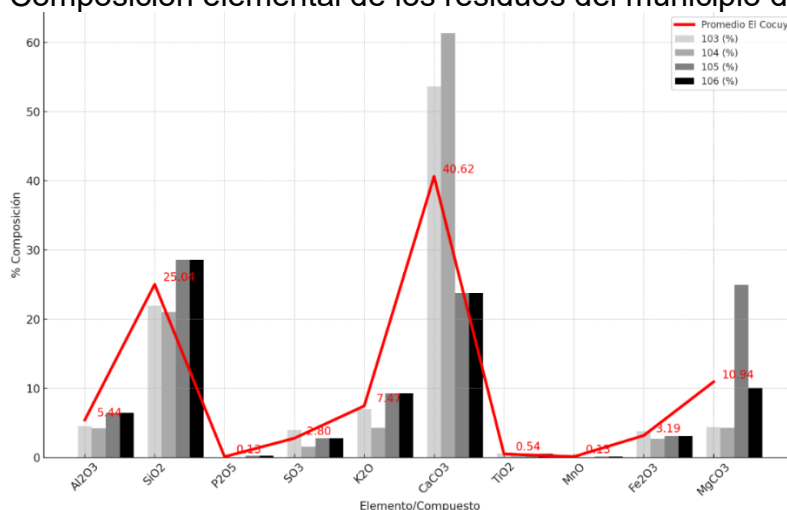
Fuente: Autor.

Elementos presentes es las muestras analizadas en el municipio de El Cocuy.

En la Figura 21 se muestran los residuos orgánicos de El Cocuy los cuales presentaron un contenido elevado de CaCO_3 (40,62%) y MgCO_3 (10,94%), lo que sugiere un buen potencial como amortiguador de acidez en suelos y como fuente de magnesio para la fotosíntesis. Aunque el contenido de K_2O (7,47%) es moderado, sigue siendo útil para fines agrícolas. Un aspecto destacable es la alta concentración de SO_3 (2,80%), superior al resto de municipios, lo que hace de estos

residuos una buena fuente de azufre, necesario para el metabolismo vegetal. Sin embargo, el contenido de fósforo (P_2O_5) es extremadamente bajo (0,13%), lo que representa una limitante importante para su uso directo como biofertilizante sin suplementación. La presencia moderada de óxidos metálicos como Fe_2O_3 (3,19%) y Al_2O_3 (5,44%) debe ser monitoreada, ya que pueden interferir con la disponibilidad de otros nutrientes si se acumulan. En general, El Cocuy tiene potencial para implementar sistemas de aprovechamiento de residuos con fines energéticos (digestión anaerobia) y correctivos agrícolas, siempre que se complemente el fósforo en formulaciones específicas.

Figura 21. Composición elemental de los residuos del municipio de El Cocuy.



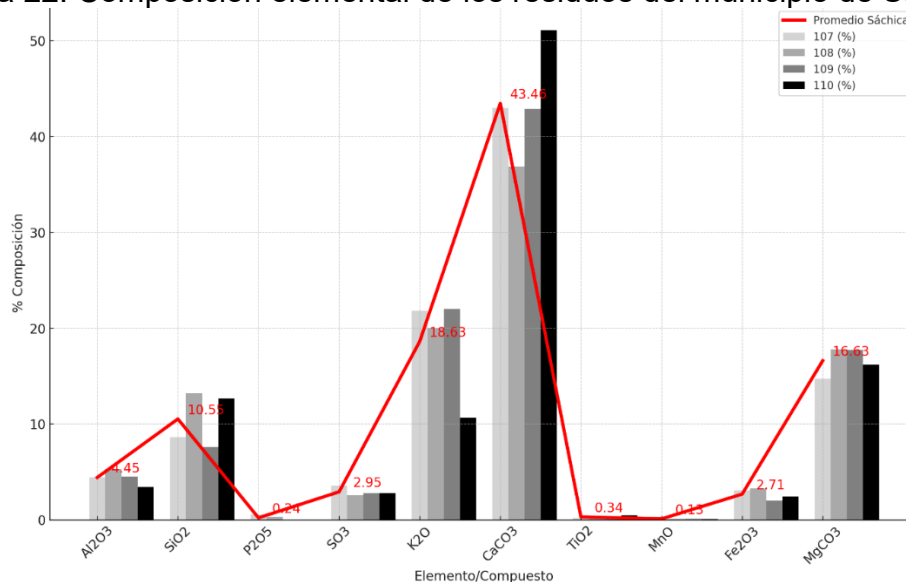
Fuente: Autor.

Elementos presentes es las muestras analizadas en el municipio de Sáchica.

Los residuos orgánicos de Sáchica presentan una composición mineral particularmente rica en carbonatos y potasio como se observa en la Figura 22, en donde se destacan por su alto contenido de $CaCO_3$ (43,46%), K_2O (18,63%) y $MgCO_3$ (16,63%). Estos valores indican un alto potencial para la formulación de bioabonos alcalinos, ideales para corregir suelos ácidos y mejorar la disponibilidad de nutrientes. El contenido elevado de potasio sugiere beneficios para cultivos exigentes en este macronutriente, como frutales o hortalizas. Aunque el contenido de P_2O_5 (0,24%) es bajo, lo cual limita el aporte natural de fósforo, los niveles de SO_3 (2,95%) aportan azufre necesario para la síntesis de proteínas en las plantas. Por otro lado, las bajas concentraciones de Al_2O_3 , TiO_2 , MnO y Fe_2O_3 indican escaso riesgo de toxicidad y buena aptitud agronómica. Esto indica que Sáchica

tiene un perfil mineral excelente para desarrollar biofertilizantes minerales y enmiendas correctoras del pH del suelo, con fuerte viabilidad para el compostaje enriquecido.

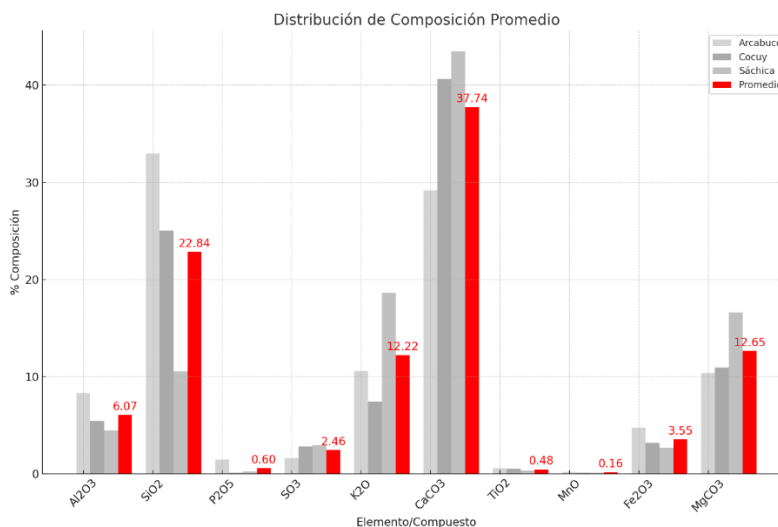
Figura 22. Composición elemental de los residuos del municipio de Sáchica.



Fuente: Autor.

En la Figura 23 se muestra que los residuos orgánicos domésticos de los municipios de Arcabuco, El Cocuy y Sáchica, los compuestos como Al₂O₃ (óxido de aluminio) y SiO₂ (dióxido de silicio) pueden estar presentes en pequeñas cantidades, ya que estos compuestos no son comunes en los alimentos, pero pueden derivar de la presencia de cenizas de materiales como cáscaras de vegetales, restos de carbón o materiales inorgánicos utilizados en el proceso de cocción. En los residuos domésticos, estos compuestos podrían estar asociados a las cáscaras de algunos alimentos como frutos secos, cáscaras de arroz o cáscaras de legumbres que al descomponerse liberan estos compuestos minerales. Estos residuos podrían ser más comunes en hogares con prácticas de cocina que incluyen el uso de procesos de cocción que impliquen la quema de alimentos o el uso de sartenes y utensilios de cocina metálicos, que también podrían contribuir a la presencia de Al₂O₃.

Figura 23. Composición elemental promedio de Arcabuco, El Cocuy y Sáchica.



Fuente: Autor.

Por otro lado, P₂O₅ (pentóxido de fósforo), aunque se encuentra en cantidades bajas, podría provenir de alimentos ricos en fósforo como los frutos secos, semillas, pescados, o productos lácteos. Este compuesto también puede estar presente en menor medida en los residuos orgánicos de la cocina si se utilizan fertilizantes en la producción de los alimentos o si los alimentos procesados incluyen este compuesto en sus aditivos. K₂O (óxido de potasio), por su parte, está asociado a residuos de alimentos como las bananas, papas y tomates, que son ricos en potasio, y cuya presencia en los residuos de cocina puede reflejar la cantidad de estos alimentos en la dieta local.

Finalmente, el CaCO₃ (carbonato de calcio) es especialmente relevante, ya que puede derivarse de cáscaras de huevo, que son comunes en los residuos orgánicos domésticos. Las cáscaras de huevo son ricas en CaCO₃, y este compuesto es una fuente natural de calcio. Este compuesto también podría encontrarse en residuos derivados de productos lácteos o incluso alimentos procesados que contengan aditivos de calcio. Su presencia en los residuos orgánicos domésticos no es sorprendente dado que las cáscaras de huevo son frecuentemente desechadas en la cocina tras la preparación de productos alimenticios como huevos cocidos, pasteles o repostería.

Los residuos orgánicos domésticos de los municipios de Arcabuco, El Cocuy y Sáchica presentan varios compuestos que pueden influir en el tipo de tratamiento adecuado, especialmente para el compostaje. Compuestos como K₂O (óxido de

potasio), P_2O_5 (pentóxido de fósforo) y $CaCO_3$ (carbonato de calcio) son clave en el proceso de compostaje, ya que el potasio favorece el desarrollo de las plantas, el fósforo es esencial para el crecimiento de las raíces, y el carbonato de calcio ayuda a regular el pH, creando un ambiente propicio para la descomposición orgánica. La presencia destacada de $CaCO_3$ en los residuos de Sáchica y El Cocuy sugiere que estos residuos son adecuados para el compostaje, ya que este compuesto facilita el control del pH durante la descomposición.

En cuanto a la producción de biogás, la presencia de compuestos como SO_3 (tríóxido de azufre) y MnO (óxido de manganeso) podría influir en la formación de compuestos volátiles durante la digestión anaeróbica. Sin embargo, la producción de biogás depende principalmente del contenido de material orgánico fácilmente biodegradable. Los residuos de cocina, que contienen una cantidad significativa de carbono y nitrógeno, son ideales para la digestión anaeróbica. Por lo tanto, aunque los compuestos minerales presentes en los residuos no son los principales impulsores de la producción de biogás, la descomposición de los materiales orgánicos puede generar biogás de manera efectiva.

El compostaje hipertermofílico, que involucra temperaturas elevadas para descomponer materiales más resistentes, también puede ser una opción viable para estos residuos. La presencia de compuestos inorgánicos como SiO_2 (dióxido de silicio) y Fe_2O_3 (óxido de hierro) no interfiere significativamente en este proceso, ya que el compostaje hipertermofílico puede manejar temperaturas altas que permiten la descomposición de materiales más difíciles. La concentración de SiO_2 en los residuos de Sáchica y El Cocuy sugiere que el compostaje hipertermofílico podría ser efectivo, dado que puede descomponer más eficientemente los materiales orgánicos resistentes presentes en los residuos domésticos.

6.1.3. FASE 3: ESTRATEGIAS DE TRATAMIENTO Y APROVECHAMIENTO.

Compostaje:

El compostaje es una tecnología adecuada para Arcabuco, dado que el municipio ya tiene una base de compostaje comunitario. Con un contenido promedio de humedad de 75,82%, los residuos orgánicos en Arcabuco son relativamente húmedos, lo cual es favorable para el compostaje, ya que la humedad ayuda a la actividad microbiana que descompone la materia orgánica. Sin embargo, el control de la humedad será crucial, con un contenido adecuado de carbono (9,70%) y una relación C/N de 30,71, la mezcla de residuos es apropiada para el compostaje, aunque podría beneficiarse de la adición de residuos más ricos en nitrógeno para equilibrar la relación C:N.

La viabilidad técnica en Arcabuco también es bastante favorable, ya que existe un nivel básico de conocimiento y experiencia en la gestión de residuos orgánicos. Sin embargo, este proceso necesita un control adecuado de la humedad, aireación y el espacio disponible para optimizar la descomposición. Arcabuco tiene el potencial para seguir utilizando y expandiendo esta tecnología, promoviendo la participación comunitaria y, a largo plazo, consolidándose como un modelo de manejo sostenible de residuos orgánicos.

El compostaje presenta una viabilidad moderada en Sáchica, ya que, aunque los residuos tienen un contenido de humedad relativamente bajo (73,62%), el municipio podría aprovechar esta característica para optimizar el proceso de compostaje. Sin embargo, la falta de experiencia en la implementación de compostaje podría requerir capacitación y asistencia técnica. Con un contenido de carbono de 10,58% y una relación C/N de 30,77, Sáchica podría necesitar la adición de residuos ricos en nitrógeno para optimizar el proceso de compostaje. A largo plazo, esta tecnología es viable si se implementa en escuelas o proyectos productivos.

El Cocuy tiene un historial exitoso en el tratamiento de residuos orgánicos, con un abono registrado por el ICA. Esto facilita la implementación y expansión del compostaje. Con un contenido de humedad de 74,81% y una relación C/N de 30,54, el compostaje tradicional es viable. El Cocuy podría fortalecer su proceso de compostaje, implementando técnicas de monitoreo y mejorando el control de la humedad para optimizar la descomposición.

Compostaje Termofílico:

Aunque el compostaje termofílico es viable, las temperaturas más bajas en Arcabuco pueden dificultar el proceso. El compostaje termofílico requiere temperaturas más altas para ser eficiente, por lo que la temperatura ambiental más baja en Arcabuco puede requerir un monitoreo más preciso y controles adicionales para asegurar un adecuado aumento de la temperatura en las pilas de compost, para ello se requieren de composteras que puedan garantizar estos procesos.

El compostaje termofílico es una opción a mediano plazo en El Cocuy, ya que la comunidad ya tiene experiencia con el compostaje tradicional. Esta tecnología, que acelera la descomposición a temperaturas más altas, sería adecuada para El Cocuy, especialmente porque los residuos orgánicos son frescos y húmedos. Con un monitoreo adecuado de las condiciones, esta tecnología podría implementarse para obtener compost de alta calidad en un tiempo más corto pero en pilas que se puedan controlar las temperaturas debido a que la temperatura ambiente es muy baja.

Las temperaturas más altas en Sáchica favorecen el proceso termofílico. Con temperaturas más cercanas al rango ideal (70-80°C) dentro de las pilas, este proceso puede ser mucho más efectivo y rápido. Este municipio podría aprovechar mejor el compostaje termofílico para acelerar la descomposición de los residuos orgánicos al poder generar condiciones más estables.

Vermicompostaje:

El vermicompostaje también es una opción viable en Arcabuco, Sáchica y El Cocuy, debido a la tradición agrícola y el interés en prácticas sostenibles. Aunque la temperatura óptima para las lombrices se encuentra entre 15°C y 25°C, las condiciones en Arcabuco podrían ser adecuadas para el vermicompostaje, especialmente en pequeños huertos familiares o escuelas. Con una proporción adecuada de residuos orgánicos y una baja presencia de contaminantes, la implementación de lombricultura en Arcabuco podría ser beneficiosa. Sin embargo, la capacitación y la infraestructura mínima son necesarias para asegurar el éxito de este proceso.

Dado el contexto de Arcabuco, esta tecnología podría implementarse gradualmente en pequeñas huertas familiares, centros educativos y fincas locales, mejorando la calidad del compost generado por el compostaje tradicional.

Digestión Anaeróbica:

La digestión anaeróbica tiene una viabilidad media a largo plazo en Arcabuco. Aunque la tecnología podría ser interesante para la generación de biogás, la falta de experiencia con biodigestores y el costo inicial podrían ser barreras significativas. La comunidad podría beneficiarse de la instalación de pequeños biodigestores, particularmente en áreas rurales. Sin embargo, es necesario un apoyo técnico externo para garantizar el éxito del proceso.

La digestión anaeróbica para Sáchica presenta una baja viabilidad a corto plazo en Sáchica, debido a la falta de infraestructura y conocimientos técnicos sobre biodigestores. Sin embargo, los residuos orgánicos húmedos en la región sugieren que, a largo plazo, esta tecnología podría ser implementada en fincas o escuelas agrícolas, con apoyo técnico adecuado. El biogás generado podría ser utilizado para energía renovable, como calefacción o cocina en hogares rurales.

Esta tecnología es viable a corto plazo en El Cocuy, debido a su tradición agrícola y la disponibilidad de residuos orgánicos húmedos. Los biodigestores domésticos o comunitarios podrían implementarse en zonas rurales para la producción de biogás, una fuente de energía renovable que podría usarse para cocina o calefacción. La principal barrera es la inversión inicial y la capacitación técnica.

Otras Tecnologías (Incineración, Gasificación, Pirólisis, Hidrotermólisis):

En el caso de Arcabuco, Sachica y El Cocuy, las tecnologías térmicas no son viables a corto plazo debido a los altos costos de operación y mantenimiento, y el contenido de humedad elevado de los residuos orgánicos, que reduce la eficiencia de la incineración y la gasificación. Además, la infraestructura técnica es limitada. Estas tecnologías pueden considerarse en el futuro dentro de un sistema regional o industrial más grande, pero no representan una opción inmediata para Arcabuco.

Biocircuitos Integrados de Energía y Fertilización:

La implementación de biocircuitos integrados es viable a mediano plazo, especialmente dado que Arcabuco tiene una tradición en compostaje y una vocación agropecuaria. Si se articula con otros municipios, los biocircuitos que integran la producción de biogás y compost podrían ser una opción de desarrollo sostenible a largo plazo, favoreciendo tanto la producción de energía renovable como la fertilización de suelos.

Sáchica podría beneficiarse de la implementación de biocircuitos integrados de energía y fertilización en el futuro. Su vocación de restauración de suelos sugiere que la creación de un sistema de biodigestores y compostaje podría ser una solución a largo plazo. Al igual que Arcabuco, la cooperación intermunicipal sería esencial para asegurar la viabilidad de esta tecnología.

Dado el aislamiento geográfico de El Cocuy y los elevados costos asociados con el transporte y disposición de residuos en otros municipios, la implementación de biocircuitos integrados de energía y fertilización emerge como una opción estratégica a largo plazo. Esta tecnología no solo permitiría reducir los costos logísticos, sino que también fomentaría la autosuficiencia energética y la producción local de fertilizantes.

La digestión anaeróbica podría ser aprovechada para generar biogás, que sería útil para cubrir las necesidades energéticas rurales, tales como la cocción o calefacción, reduciendo la dependencia de fuentes externas de energía. Al mismo tiempo, el subproducto de este proceso, el digestato, podría ser reutilizado como fertilizante para las tierras agrícolas, promoviendo un ciclo de reutilización de recursos y contribuyendo a la mejora de la calidad del suelo, esencial en una región agrícola como El Cocuy.

Este enfoque permitiría a El Cocuy consolidar un modelo de economía circular, optimizando el aprovechamiento de los residuos orgánicos locales y transformándolos en recursos de valor agregado. Además, al reducir la dependencia de soluciones externas costosas, los biocircuitos integrados fortalecerían la resiliencia del municipio frente a desafíos económicos y medioambientales.

En la Tabla 7 se muestran las alternativas, la viabilidad y la justificación de cada una de las tecnologías de tratamiento para los municipios de Arcabuco, El Cocuy y Arcabuco.

Tabla 7. Variabilidad de alternativas tecnológicas para el tratamiento de residuos orgánicos.

Tecnología	Municipio	Viabilidad	Justificación
Compostaje	Arcabuco	Alta	Arcabuco tiene una base de compostaje comunitario. Con una relación de C/N de 30,71, esto favorece el proceso. El análisis químico muestra

Tecnología	Municipio	Viabilidad	Justificación
Compostaje Termofílico			un 9,70% de carbono, 0,35% de nitrógeno, y una relación C/N adecuada, lo que facilita la descomposición aeróbica.
	Sáchica	Alta	Sáchica tiene humedad más baja (73,62%), lo que puede ser útil para optimizar el compostaje. La relación C/N de 30,77 también favorece el proceso. El contenido de carbono es 10,58% y el nitrógeno es 0,38%, lo que es adecuado para compostaje eficiente.
	El Cocuy	Alta	El Cocuy tiene un historial exitoso en compostaje registrado. La relación C/N de 30,54 es adecuada para el proceso. El contenido de carbono es 10,11% y el nitrógeno es 0,37%, favoreciendo la actividad microbiana en la descomposición de residuos orgánicos.
	Arcabuco	Media	Las bajas temperaturas en Arcabuco dificultan el compostaje termofílico. El monitoreo de la temperatura será esencial para asegurar el aumento adecuado en las pilas. Se recomienda utilizar composteras controladas para facilitar el proceso.
Vermicompostaje	Sáchica	Alta	Las altas temperaturas en Sáchica favorecen el compostaje termofílico. El proceso será más rápido y efectivo, aprovechando las condiciones estables de temperatura en el municipio, que favorecen la descomposición acelerada.
	El Cocuy	Media	En El Cocuy, aunque es viable a mediano plazo, las temperaturas bajas requieren un monitoreo adecuado para mantener temperaturas adecuadas. Se sugiere el uso de pilas que puedan regular la temperatura y mejorar la eficiencia del proceso.
Vermicompostaje	Arcabuco	Media	La tradición agrícola y el interés en prácticas sostenibles hacen viable esta opción en Arcabuco. Sin embargo, se requiere infraestructura mínima y capacitación para implementar el

Tecnología	Municipio	Viabilidad	Justificación
			proceso, especialmente a pequeña escala.
	Sáchica	Media	A pesar de no tener uso actual, el vermicompostaje podría implementarse gradualmente en huertas o escuelas. Requiere capacitación para asegurar el éxito en su implementación.
	El Cocuy	Alta	La tradición agrícola y las condiciones favorables hacen del vermicompostaje una opción viable. Capacitación adecuada sería necesaria para asegurar su éxito.
Digestión Anaeróbica	Arcabuco	Media	Aunque la tecnología es interesante, la falta de experiencia y el alto costo inicial representan barreras. Podría funcionar en áreas rurales con apoyo técnico, especialmente para la producción de biogás.
	Sáchica	Media	No se cuenta con infraestructura ni experiencia suficiente en Sáchica para implementar digestores. Sería viable solo con asistencia técnica y apoyo institucional.
	El Cocuy	Media	La disponibilidad de residuos orgánicos húmedos hace viable la digestión anaeróbica. Requiere inversión inicial y capacitación. El monitoreo de la temperatura es crucial para asegurar la producción de biogás en el proceso.
Incineración	Arcabuco	No viable	La alta humedad en los residuos orgánicos y los costos elevados hacen inviable la incineración. Podría ser considerada en el futuro dentro de un sistema regional con plantas de tratamiento compartidas.
	Sáchica	No viable	La alta humedad en los residuos hace que la incineración no sea eficiente. Requiere infraestructura avanzada y no es viable con los recursos actuales.
	El Cocuy	No viable	Debido a los altos costos y la alta humedad, la incineración no es viable en El Cocuy. Podría ser considerada a futuro dentro de un sistema regional.
Gasificación	Arcabuco	No viable	La alta humedad en los residuos limita la eficiencia de la gasificación. La infraestructura limitada y los costos

Tecnología	Municipio	Viabilidad	Justificación
			operativos también hacen inviable esta opción a corto plazo.
	Sáchica	No viable	La gasificación requiere residuos secos y estables. La alta humedad de los residuos orgánicos de Sáchica impide una implementación viable en el corto plazo.
	El Cocuy	No viable	Al igual que en Arcabuco y Sáchica, los altos niveles de humedad y la infraestructura limitada hacen que la gasificación no sea viable a corto plazo.
Pirólisis	Arcabuco	No viable	La pirólisis es más adecuada para residuos secos. La alta humedad y los costos elevados hacen inviable esta tecnología en el corto plazo.
	Sáchica	No viable	Los residuos húmedos y la falta de infraestructura necesaria hacen que la pirólisis no sea viable para Sáchica. Los costos y la eficiencia reducida también limitan esta opción.
	El Cocuy	No viable	Al igual que los otros municipios, la pirólisis no es viable en El Cocuy debido a los altos costos y la alta humedad en los residuos.
Hidrotermólisis	Arcabuco	No viable	La hidrotermólisis requiere presiones elevadas y costos operativos significativos, lo que la hace inviable en Arcabuco debido a la falta de infraestructura.
	Sáchica	No viable	La alta humedad de los residuos orgánicos y los costos elevados hacen que la hidrotermólisis no sea viable para Sáchica. Podría ser viable a largo plazo en un esquema regional.
	El Cocuy	No viable	Similar a Arcabuco y Sáchica, la hidrotermólisis enfrenta barreras técnicas y económicas en El Cocuy, por lo que no se recomienda su implementación a corto plazo.
Biocircuitos Integrados de Energía y Fertilización	Arcabuco	Alta	Con su tradición en compostaje y vocación agropecuaria, Arcabuco puede liderar la implementación de biocircuitos integrados. La colaboración intermunicipal podría favorecer la integración de biodigestores y compostaje.

Tecnología	Municipio	Viabilidad	Justificación
Deshidratación y Trituración	Sáchica	Alta	Sáchica podría beneficiarse de los biocircuitos a largo plazo. La integración de biodigestores y compostaje requiere apoyo técnico y colaboración con otros municipios.
	El Cocuy	Alta	Dado su aislamiento geográfico y los altos costos de disposición, El Cocuy se beneficiaría de la autosuficiencia energética y la producción local de fertilizantes.
	Arcabuco	Alta	La deshidratación y trituración con hornos solares es una excelente opción a largo plazo. Aunque costosa energéticamente, los hornos solares ofrecen una alternativa sostenible y rentable a largo plazo. Se recomienda evaluar la composición química para monitorear cambios en los nutrientes y hacer un esfuerzo inicial de inversión.
	Sáchica	Alta	En Sáchica, las temperaturas más altas hacen que el uso de hornos solares sea una excelente alternativa, lo que mejora la eficiencia energética. Se recomienda evaluar la composición química para ajustar el proceso.
	El Cocuy	Alta	La deshidratación y trituración es viable en El Cocuy con el uso de energía solar, debido a la alta radiación solar. La evaluación de la composición química es crucial para asegurar la calidad de los nutrientes siendo esta una excelente oportunidad para el municipio.

Fuente: Autor.

Posterior a ello se realizó la evaluación multicriterio de cada tecnología según tres aspectos fundamentales establecidos en la metodología: viabilidad ambiental, económica y técnica.

La viabilidad ambiental se centra en el impacto que cada tecnología puede tener sobre el medio ambiente, considerando su capacidad para reducir la contaminación, generar energía limpia o mejorar la calidad del suelo. Este criterio es crucial para garantizar que las soluciones adoptadas no solo sean efectivas, sino también sostenibles a largo plazo.

La viabilidad económica evalúa el costo de implementación y mantenimiento de cada tecnología, teniendo en cuenta tanto las inversiones iniciales como los costos operativos. Esto es esencial para determinar si una tecnología es accesible y puede ser adoptada por los municipios sin generar una carga económica insostenible. Finalmente, la viabilidad técnica analiza la facilidad de implementación de las tecnologías en función de los recursos disponibles, la infraestructura existente y la capacidad local para gestionarlas, lo que permite identificar las soluciones más factibles a nivel práctico y de ejecución.

Esta metodología se justifica en el hecho de que cada uno de estos criterios aborda aspectos clave de la sostenibilidad y la eficiencia operativa, que son determinantes para la elección de la mejor opción en el manejo de residuos orgánicos.

Al aplicar esta evaluación en tres municipios con características distintas, se puede obtener una visión holística de las tecnologías disponibles, considerando no solo su potencial ambiental, sino también su rentabilidad y factibilidad de implementación. Esta evaluación permite a los tomadores de decisiones identificar las soluciones que mejor se adaptan a las condiciones locales, promoviendo así el desarrollo de prácticas sostenibles y accesibles para la gestión de residuos orgánicos en cada comunidad. De acuerdo con los criterios de viabilidad ambiental, económicos y técnicos establecidos en la metodología se obtiene:

Evaluación para el municipio de Arcabuco:

Las tres mejores tecnologías en términos de viabilidad para Arcabuco, según la Tabla 8, son el Compostaje, la Deshidratación y Trituración y los Biocircuitos Integrados. El compostaje destaca por su puntuación perfecta de 9 en todos los criterios, lo que lo convierte en una solución altamente viable debido a su bajo impacto ambiental, su rentabilidad económica y su facilidad de implementación técnica.

Tabla 8. Valoración multicriterio para tecnologías en el municipio de Arcabuco.

Tecnología	Viabilidad Ambiental (Arcabuco)	Viabilidad Económica (Arcabuco)	Viabilidad Técnica (Arcabuco)	Viabilidad
Compostaje	9	9	9	9
Digestión Anaerobia	6	6	6	6
Pirólisis	2	2	2	2

Tecnología	Viabilidad Ambiental (Arcabuco)	Viabilidad Económica (Arcabuco)	Viabilidad Técnica (Arcabuco)	Viabilidad
Gasificación	2	5	2	3
Vermicompostaje	9	9	9	9
Incineración	2	2	2	2
Termovalorización	2	5	2	3
Hidrotermólisis	2	2	5	3
Termo-compostaje	9	6	6	7
Digestión en Agua Supercrítica	2	2	2	2
Biocircuitos Integrados	9	9	9	9
Deshidratación y Trituración	9	9	9	9

Fuente: Autor.

Por otro lado, la Deshidratación y Trituración, que también obtiene puntuaciones máximas en todos los aspectos, se presenta como una opción atractiva gracias a su eficiencia energética, especialmente con el uso de hornos solares, que la hace económicamente accesible y técnicamente viable. Finalmente, los Biocircuitos Integrados ofrecen una alternativa sólida con igual puntuación de 9, combinando compostaje y biodigestores para fomentar la autosuficiencia energética y la producción local de fertilizantes, lo que es crucial para una comunidad rural como Arcabuco.

Evaluación para el municipio de Sáchica

Las tres mejores tecnologías en términos de viabilidad para Sáchica, según la Tabla 9, son el Compostaje, la Vermicompostaje y los Biocircuitos Integrados. Al igual que en Arcabuco, el compostaje se destaca por su puntuación perfecta de 9 en todos los criterios, lo que demuestra su alta viabilidad en términos ambientales, económicos y técnicos. Esta tecnología es sostenible, de bajo costo y fácil de implementar, lo que la hace ideal para Sáchica.

Tabla 9. Valoración multicriterio para tecnologías en el municipio de Sáchica.

Tecnología	Viabilidad Ambiental (Sáchica)	Viabilidad Económica (Sáchica)	Viabilidad Técnica (Sáchica)	Viabilidad
Compostaje	9	9	9	9
Digestión Anaerobia	8	6	6	7
Pirólisis	2	2	2	2
Gasificación	2	5	2	3
Vermicompostaje	9	9	9	9
Incineración	2	2	2	2
Termovalorización	2	5	2	3
Hidrotermólisis	2	2	5	3
Termo-compostaje	9	6	6	7
Digestión en Agua Supercrítica	2	2	2	2
Biocircuitos Integrados	9	9	9	9
Deshidratación y Trituración	9	9	9	9

Fuente: Autor.

Además, la Vermicompostaje también obtiene una puntuación perfecta, lo que la convierte en una excelente opción debido a las condiciones favorables y la tradición agrícola de Sáchica. Esta tecnología permite la producción de abono de alta calidad mediante lombrices, y su implementación a pequeña escala sería técnicamente viable y económica. Finalmente, los Biocircuitos Integrados también son una de las mejores opciones, con su enfoque en la combinación de biodigestores y compostaje para maximizar la autosuficiencia y producción de fertilizantes locales.

Evaluación para el municipio de El Cocuy

Para El Cocuy, la Tabla 10 muestra las tecnologías más viables en términos ambientales, económicos y técnicos son el Compostaje, la Deshidratación y Trituración y los Biocircuitos Integrados. Estas opciones sobresalen con la mejor puntuación en los tres criterios de evaluación, lo que refleja su alta viabilidad en la región. El Compostaje se destaca por su impacto positivo en la fertilidad del suelo, apoyado por el historial exitoso en el municipio.

Tabla 10. Valoración multicriterio para tecnologías en el municipio de El Cocuy.

Tecnología	Viabilidad Ambiental (El Cocuy)	Viabilidad Económica (El Cocuy)	Viabilidad Técnica (El Cocuy)	Viabilidad
Compostaje	9	9	9	9
Digestión Anaerobia	8	8	8	8
Pirólisis	2	2	2	2
Gasificación	2	5	2	3
Vermicompostaje	9	9	9	9
Incineración	2	2	2	2
Termovalorización	2	5	2	3
Hidrotermólisis	2	2	5	3
Termo-compostaje	9	6	6	7
Digestión en Agua Supercrítica	2	2	2	2
Biocircuitos Integrados	9	9	9	9
Deshidratación y Trituración	9	9	9	9

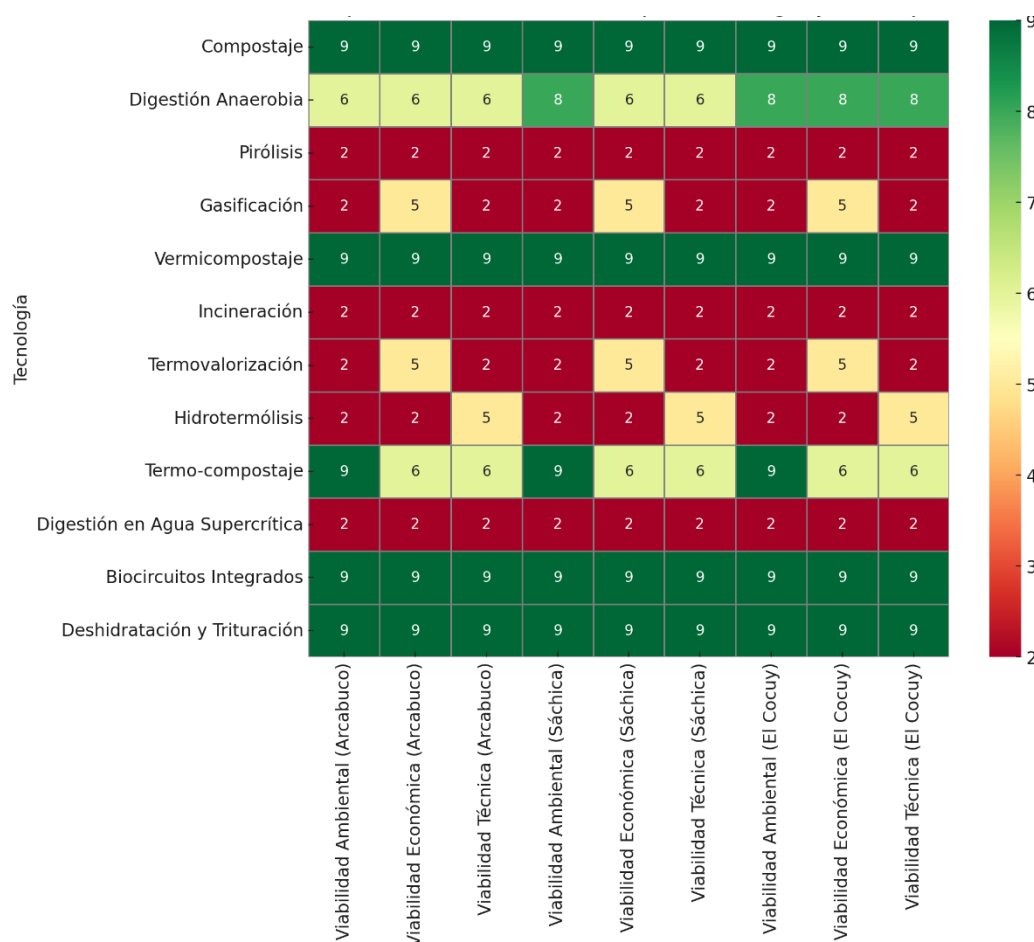
Fuente: Autor.

Por otro lado, el Vermicompostaje aprovecha las condiciones agrícolas favorables y puede implementarse fácilmente en pequeños espacios, como huertas familiares. Los Biocircuitos Integrados, que combinan la producción de biogás y compostaje, son una opción sostenible y de largo plazo, con la capacidad de proporcionar tanto energía renovable como fertilizantes locales. Finalmente, la Deshidratación y Trituración, con el uso de energía solar, también se presenta como una solución efectiva y eficiente para El Cocuy, maximizando el aprovechamiento de los recursos disponibles.

La Figura 24 de calor muestra la evaluación de viabilidad para distintas tecnologías en los tres municipios: Arcabuco, Sáchica y El Cocuy, considerando tres criterios: viabilidad ambiental, económica y técnica. Los resultados reflejan que tecnologías como el compostaje, vermicompostaje, biocircuitos integrados y deshidratación y trituración se destacan en todos los municipios con altas puntuaciones (verde), lo que las convierte en opciones muy viables en términos de sostenibilidad, costo y factibilidad técnica. Estas tecnologías tienen un bajo impacto ambiental, son económicamente rentables a largo plazo y son fácilmente implementables, lo que

las hace adecuadas para el contexto de los tres municipios, cada uno con sus particularidades.

Figura 24. Evaluación de viabilidad para distintas tecnologías de los municipios de Arcabuco, El Cocuy y Sáchica.



Fuente: Autor.

Por otro lado, tecnologías como la pirólisis, la gasificación, la incineración y la digestión en agua supercrítica muestran bajas puntuaciones (rojo y amarillo), lo que indica que son menos viables en todos los municipios, principalmente debido a los altos costos operativos, la necesidad de infraestructura avanzada y el impacto ambiental negativo que pueden generar. En general, los resultados destacan que las soluciones que aprovechan los recursos locales de forma eficiente y sostenible, como el compostaje y los biocircuitos integrados, son las más adecuadas para estos

municipios, mientras que las tecnologías más intensivas en recursos y de mayor impacto ambiental requieren mayor reconsideración y adaptación en el futuro.

El municipio de Arcabuco debe continuar fortaleciendo las prácticas de compostaje comunitario, ya que esta tecnología se ha evaluado como una de las más viables. Además, se sugiere integrar el vermicompostaje a pequeña escala, lo que permitirá continuar con el progreso en el manejo de residuos. Los biocircuitos integrados que combinan compostaje y digestión anaeróbica representan una alternativa importante para Arcabuco. Sin embargo, su implementación requiere un fuerte compromiso y una inversión considerable en infraestructura y en la formación de procesos comunitarios. Es fundamental que el departamento comience a apoyar este tipo de iniciativas, controlando los vectores para evitar problemas de salud pública y sanitarios.

Por otro lado, la deshidratación y trituración surge como una alternativa con un costo de inversión inicial elevado para los tres municipios. A pesar de ello, el uso de paneles solares para la deshidratación y trituración permite acelerar el proceso, completándolo en menos de 36 horas, lo que muestra que es posible transformar los residuos orgánicos de manera eficiente, incluso con un alto volumen de generación. En El Cocuy y Sáchica, el compostaje, el vermicompostaje y los biocircuitos también son alternativas viables, aunque es importante destacar que, a partir de la investigación sobre la recolección y secado de residuos, se ha demostrado que en las primeras 36 horas de procesamiento se obtienen abonos de calidad.

Es esencial evaluar la composición química de estos insumos para entender cómo varía entre el estado húmedo y seco de los residuos. Este estudio demuestra que la deshidratación y trituración es una opción rápida y de bajo costo en cuanto a operación, aunque se debe considerar la inversión en hornos solares, lo cual es crucial para reducir la cantidad de residuos dispuestos en los rellenos sanitarios.

6.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

Proyección poblacional

La proyección poblacional para Arcabuco entre 2025 y 2035 muestra un crecimiento moderado del 1.8% anual, con un aumento estimado de 277 habitantes (Alcaldía Municipal de Arcabuco, 2025). Esta tendencia estable sugiere condiciones favorables de permanencia o atracción de población, posiblemente asociadas a mejoras socioeconómicas. En términos de gestión de residuos, esta dinámica implica un crecimiento predecible en la generación, lo que permite planificar estrategias progresivas de aprovechamiento, como el compostaje descentralizado. Sin embargo, se debe tener en cuenta que las proyecciones no consideran eventos imprevistos que podrían alterar estas cifras. En Sáchica, el crecimiento poblacional ha sido más pronunciado, ya que se proyecta un aumento del 72.8% entre 2005 y 2035, con un incremento de 1.389 personas. Este comportamiento sostenido representa un desafío para la infraestructura actual de residuos sólidos, ya que una mayor población implica mayor volumen de generación. En este contexto, es necesario fortalecer estrategias de aprovechamiento orgánico, como compostaje y digestión anaerobia, así como mejorar la recolección diferenciada para garantizar una gestión sostenible frente al aumento de la demanda. El Cocuy presenta un crecimiento poblacional mucho más moderado. Aunque se proyecta un aumento de 212 habitantes en su área urbana entre 2025 y 2035, el comportamiento histórico ha sido casi estancado, con apenas un 18.1% de incremento en tres décadas. Esta estabilidad representa una oportunidad para consolidar sistemas de tratamiento de residuos ya implementados, sin necesidad de grandes expansiones. Tecnologías como el compostaje comunitario o plantas piloto de biogás pueden optimizarse en este contexto, dada la baja presión demográfica y la previsibilidad en la generación de residuos.

Generación de residuos

Los datos del municipio de Arcabuco en el período 2012–2024, se observa un crecimiento del 94.92 % en la producción de residuos frente a un crecimiento poblacional de solo el 24 %. Mngomezulu et al., (2024) sugiere que el aumento en los residuos se debe más a factores socioeconómicos, como el consumo y la actividad comercial, que al crecimiento demográfico. Además, la composición sectorizada revela una alta proporción de residuos aprovechables, especialmente en el sector institucional, lo que representa una oportunidad para fortalecer estrategias de valorización como el reciclaje y el compostaje. Rodríguez Guerra &

Baca Cajas, (2022) hacen referencia a que las fluctuaciones mensuales presentes resaltan la influencia de eventos estacionales o económicos en la generación de residuos, lo que exige sistemas flexibles y adaptables de gestión.

En El Cocuy, entre 2012 y 2024, la producción mensual de residuos aumentó en un 139 %, mientras que la población apenas creció un 9 %. Yogalakshmi, (2019) y Denafas et al., (2014) afirman que esta diferencia evidencia que factores como la urbanización, el turismo o el aumento en el consumo tienen mayor impacto que el crecimiento poblacional y que los picos estacionales en meses como mayo y diciembre también indican la necesidad de ajustar operativamente los sistemas de recolección y tratamiento, considerando la variabilidad mensual. Además en el municipio presento una producción creciente, pero sin fluctuaciones abruptas, lo que favorece la implementación de estrategias sostenibles y escalables.

Sáchica para el mismo periodo de 2012 - 2024, la producción mensual de residuos creció un 154.3 %, mientras que la población solo aumentó un 33 %, lo que indica que cerca del 121 %. Autores como Voukkali et al., (2023) argumentan que este tipo de incrementos en residuos obedece a transformaciones en los patrones de consumo y dinámicas urbanas, como el aumento en la densidad poblacional, que según Ailyn, (2025) implica cambios en las dinámicas de la población. Además, de que en el municipio hay una gran actividad turística que según Mateu-Sbert et al., (2013) a pesar de que el turismo ayuda a la generación de empleo e ingresos, también genera grandes problemáticas respecto a la generación de residuos. Estas características evidencian la necesidad de implementar estrategias sectorizadas y robustas, con especial énfasis en la valorización de orgánicos y la eficiencia en el reciclaje.

Análisis de series temporales y construcción del modelo matemático.

El análisis de la producción per cápita (PPC) de residuos sólidos en los municipios de Arcabuco, Sáchica y El Cocuy revela tendencias crecientes que reflejan patrones similares a los observados a nivel nacional y regional. En el caso de **Arcabuco**, la PPC pasó de 0.31 kg/hab·día en 2012 a 0.46 kg/hab·día en 2024. Aunque se mantiene dentro del límite de 0.45 kg/hab·día establecido por el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), la proyección a 2036 estima una PPC de 0.61 kg/hab·día, lo que representa un incremento significativo con implicaciones directas sobre el costo de la prestación del servicio de aseo. Este incremento refleja una evolución constante, alineada con lo reportado por Rodríguez Escobar, (2002) sobre la influencia del aumento en el consumo de

bienes y servicios además Egea-Ronda et al., (2023) afirma que los cambios en el estilo de vida en municipios también contribuye al aumento en la generación de residuos. Wikurendra et al., (2023) afirma que los modelos de proyección basados en regresión lineal, son de gran exactitud para la predicción en la generación de residuos. Por otra parte, los modelos basados en estos métodos y en la multiplicación de población por PPC muestran resultados más ajustados a la realidad local, frente al modelo normativo RAS que subestima la generación real en hasta 18.6 toneladas/mes.

Una tendencia más pronunciada se observa en Sáchica, donde la PPC aumentó de 0.33 kg/hab·día en 2012 a 0.63 kg/hab·día en 2024, superando claramente el valor referencial del RAS. Cerna-Cueva et al., (2022) asocia esta situación no solo al crecimiento poblacional, sino también al incremento del turismo, las actividades comerciales y los cambios en los patrones de consumo. Las proyecciones a 2036 anticipan una PPC de hasta 0.98 kg/hab·día, que según (Grau et al., 2015) están cercana a los valores promedio de países latinoamericanos, donde se ha reportado un rango de 0.6 a 0.9 kg/hab·día en zonas urbanas. Nuevamente, los modelos estadísticos ajustados a datos históricos proyectan hasta 96.9 toneladas/mes, frente a solo 42 toneladas/mes estimadas por el PPC RAS, generando una brecha preocupante de más de 50 toneladas mensuales.

En El Cocuy, el análisis retrospectivo muestra un crecimiento sostenido en la PPC, que pasó de 0.27 kg/hab·día en 2012 a 0.59 kg/hab·día en 2024, y se proyecta que alcanzará los 0.80 kg/hab·día en 2036. Uribe & Muñoz, (2017) atribuyen que el aumento se debe principalmente a factores económicos y sociales, como el turismo y el hecho de ser cabecera provincial, más que al crecimiento poblacional directo, estaría generando esta problemática. Esta situación se refleja en los modelos de proyección, donde los métodos basados en regresión lineal y población × PPC proyectan una generación mensual de 66.2 toneladas para 2036, en contraste con las 37 toneladas estimadas por el método RAS, lo que representa una diferencia de 29.2 toneladas. Además, Benitez-Bravo et al., (2021) hace referencia a la distancia respecto a los rellenos sanitarios, implica un alza significativa en los costos operativos del servicio, lo que subraya la necesidad de adoptar estrategias basadas en principios de economía circular

Estas evidencias concuerdan con el comportamiento nacional, donde el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) reportó que la generación per cápita de residuos en Colombia aumentó de 485 kg/hab·año en 2012 a 593 kg/hab·año en 2021, lo que representa un crecimiento del 22.3 % en menos

de una década (DANE, 2022). Asimismo, (Sturzenegger, (2014) señala que muchos municipios latinoamericanos enfrentan aumentos per cápita similares, con una media de 0.6 a 0.9 kg/hab·día.

Cálculo de la producción per cápita (PPC) ajustada con modelos de prospectiva.

La comparación de las proyecciones de Producción Per Cápita (PPC) en Arcabuco, Sáchica y El Cocuy (2012–2036) revela que, aunque los tres municipios comparten una tendencia creciente, cada uno exhibe características propias en su velocidad de crecimiento y comportamiento demográfico. En El Cocuy, la PPC crece de forma gradual hasta cerca de 2030, cuando su aceleración se hace más evidente, posiblemente motivada por el aumento del turismo en el Parque Nacional Natural El Cocuy, junto con el crecimiento poblacional y la actividad económica. Por su parte, Sáchica presenta un aumento más abrupto y sostenido: mientras en los primeros años se mantiene estable, en la posterior curva se acelera marcadamente, proyectando incrementos de hasta un 46 % respecto al valor actual de PPC. En contraste, Arcabuco mantiene el ritmo más moderado de los tres, aunque también creciente, por lo que su evolución se ve más controlada y gradual.

Estas diferencias reflejan que el uso de un valor fijo de PPC, como el RAS (que establece valores entre 0.3 y 0.75 kg/hab·día), no captura la realidad particular de cada territorio ni los efectos de factores como hábitos de consumo, urbanización o población flotante. Si bien los tres municipios están categorizados dentro de la misma sexta categoría normativa, sus trayectorias demográficas y socioeconómicas son distintas, lo que demanda modelos de análisis retrospectivos específicos y contextualizados.

En cuanto a la generación total de residuos, los métodos basados en modelos locales (regresión lineal y población × PPC) proyectan una producción mensual creciente: 60.6 ton/mes en Arcabuco, 96.9 ton/mes en Sáchica y 66.2 ton/mes en El Cocuy para el año 2036. En todos los casos, estas cifras superan ampliamente las estimaciones basadas en el PPC del RAS: aproximadamente 52 ton/mes en Arcabuco, 96 t/mes en Sáchica, y solo 37 t/mes en El Cocuy. Particularmente, El Cocuy evidencia una diferencia de 29.2 ton/mes, mientras que Sáchica alcanza una brecha de 54.9 ton/mes entre los enfoques locales y el RAS, un desajuste significativo en planificación.

Fase 2:

Análisis químico

Estudios realizados por Yeh et al., (2020) y Acosta & Abreu, (2005) y otros, en la elaboración de compostaje, digestión anaerobia, vermicompostaje evidenciaron que un contenido de humedad inicial entre el 55% y el 70% es adecuado para asegurar una descomposición eficiente de los residuos alimentarios y de acuerdo con los resultados obtenidos las muestras de los tres municipios están ligeramente por encima del 70%, por lo cual este valor se tendría que disminuir, ya que autores como Liang et al., (2003) indican que el contenido de humedad es un parámetro importante en este proceso ya que impacta en gran manera la actividad microbiana aeróbica y anaeróbica, si se van a hacer tratamientos de tipo.

Según Lee et al., (2025) y Olivera Murcia, (2022) para iniciar adecuadamente el proceso de compostaje ya sea aeróbico, anaeróbico, termofílico o para llevar acabo procesos de vermicompostaje, es fundamental que la mezcla de los residuos orgánicos se formule con una relación carbono/nitrógeno (C/N) inicial dentro del rango óptimo de 25:1 a 30:1. Según los resultados obtenido los tres municipios cumplen con esta relación 30:1 de C:N, a pesar de que los resultados superaron ligeramente este valor, este no representa un riesgo alto para los microorganismos que se encargan de la descomposición de la materia orgánica. Aun así se recomienda agregar material con mayor contenido de nitrógeno para conseguir una relación C:N más adecuada si se quiere llevar a cabo estos procesos y teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los municipios. Por otra parte estudios llevados a cabo por Jiang et al., (2011) revelaron que una relación C/N baja aumenta significativamente las emisiones de NH_3 y CH_4 , mientras que una relación más alta disminuye dichas emisiones, por ello es de vital importancia tener relaciones equilibradas de C:N en este tipo de procesos.

Delgado Arroyo et al., (2019) señala el carbono como la fuente principal de energía para los microorganismos descomponedores ya que determina el ritmo del proceso y la estabilidad del producto final. Los tres municipios analizados presentaron altos porcentajes de C, lo que les permita tener una buena relación C:N. Mula, (2012) señala que, en el compostaje aeróbico, termofílico y vermicompostaje, valores de C:N permiten una adecuada alimentación para los microorganismos sin generar ambientes tóxicos. En la digestión anaerobia, el carbono sigue siendo esencial, pero debe ser equilibrado con el nitrógeno para evitar acumulaciones de ácidos volátiles.

Parra Huertas, (2015) señala que el hidrogeno desempeña un papel fundamental en los procesos anaerobios, ya que interviene en la generación de metano (CH_4) a través de la acción de microorganismos metanogénicos en los procesos de fermentación. Un desequilibrio entre la producción y el consumo de H_2 puede provocar su acumulación, lo que inhibe el desarrollo del proceso. En el compostaje aeróbico y termofílico, el hidrógeno participa en las reacciones metabólicas que generan calor, favoreciendo el aumento de temperatura. En el vermicompostaje, su influencia es más bien indirecta, relacionada con el contenido energético de los residuos.

El oxígeno es esencial para todos los procesos aeróbicos como el compostaje aeróbico, termofílico y vermicompostaje, autores como Nguyen et al., (2023) señalan que en los niveles adecuados asegura una descomposición eficiente, además que es vital para los microorganismos. Por otro lado, este evita condiciones anaerobias que podrían ralentizar el proceso y generar malos olores. En digestión anaerobia, Méndez-Novelo et al., (2012) afirma que el oxígeno debe estar ausente para permitir el desarrollo de microorganismos estrictamente anaerobios. Por tanto, el control de este elemento en función del proceso es determinante para su éxito.

Naranjo Bedoya & Alejandro, (2024) afirma que el nitrógeno es imprescindible para la síntesis de proteínas microbianas. Sin embargo, en exceso puede generar la pérdida de amoníaco (NH_3), especialmente en procesos termofílicos donde la volatilización se intensifica. En compostaje aeróbico y termofílico Tortosa, (2018) hace énfasis en que una relación C/N inadecuada puede traducirse en emisiones de gases o ineficiencia del proceso. En vermicompostaje, niveles elevados de nitrógeno pueden causar toxicidad directa para las lombrices. Para el proceso de digestión anaerobia en estudios llevado a cabo por Morozova et al., (2020) encontró que el nitrógeno en exceso también puede inhibir las fases metanogénicas, por lo que su regulación es crítica para la producción estable de biogás.

Los residuos orgánicos de los municipios presentan un contenido moderadamente bajo de azufre. Aunque en compostaje aeróbico, termofílico y vermicompostaje estos niveles no suelen representar un riesgo, es importante monitorearlos, por otro lado en condiciones anaerobias Torres-Calderón et al., (2020) señala que el azufre puede transformarse en sulfuro de hidrogeno (H_2S), un gas tóxico, corrosivo y maloliente que afecta negativamente la producción de biogás y puede ser perjudicial para las lombrices.

En cuanto a los haluros Los haluros no participan activamente en procesos como el compostaje o la digestión anaerobia, ya que no se degradan ni intervienen en rutas microbianas; su presencia se relaciona más con ciertos tipos de residuos. Por otra parte Rodríguez Martín, (2021) señala que la valorización energética, la gasificación y la pirólisis aprovechan directamente el poder calorífico bruto, neto y el HHV para generar syngas, bioaceites o biochar. En cambio, en procesos biológicos como el compostaje o la digestión anaerobia, estos valores solo sirven como indicadores del potencial energético residual o para co-tratamientos.

PISTOLA XRF

La composición inorgánica de los residuos en Arcabuco revela un potencial importante para el compostaje, tanto por su estructura física como por su valor agronómico. Autores como Głąb et al., (2025) y Mosallanejad et al., (2018) señalan que la alta presencia de óxidos minerales como SiO_2 (32,93%), Al_2O_3 (8,32%) y Fe_2O_3 (4,76%), aunque no aportan nutrientes, mejoran la aireación, porosidad y estabilidad del compost, facilitando su maduración. Por su parte, el elevado contenido de CaCO_3 (29,16%), MgCO_3 (10,39%) y K_2O (10,58%) le otorga propiedades correctivas y fertilizantes, especialmente útiles para suelos ácidos. El P_2O_5 (1,45%) fue superior al de los otros municipios es relevante, ya que este nutriente es esencial y suele ser limitado en muchos suelos tropicales. Además, los bajos niveles de metales como MnO y TiO_2 reducen riesgos de toxicidad en suelos agrícolas. En conjunto, estos residuos presentan condiciones favorables para un compost estructurado, estable y con fertilidad moderada.

La composición química de los residuos orgánicos en El Cocuy revela un alto contenido de carbonatos, principalmente CaCO_3 (40,62%) y MgCO_3 (10,94%), C. Wang et al., (2015) afirma que este tipo de elementos confiere un buen potencial como enmiendas agrícolas, ya que los carbonatos inhiben la adsorción de metales pesados del suelo a las plantas, que en suelos ácidos, al mejorar el pH y aportar magnesio útil para la fotosíntesis. El K_2O (7,47%), aunque moderado, representa un aporte útil en fertilización, siendo esencial para funciones fisiológicas en las plantas. La concentración de SO_3 (2,80%) es notable, ya que el azufre mejora el metabolismo vegetal y es comúnmente deficiente en suelos andinos. Sin embargo, el bajo contenido de fósforo (P_2O_5 : 0,13%) limita su aplicación directa como biofertilizante, por lo que se requiere suplementación externa, como lo sugiere Khan et al., (2023). Además, Li et al., (2021) dice que la presencia moderada de Fe_2O_3 (3,19%) y Al_2O_3 (5,44%) podría interferir con la disponibilidad de nutrientes como el fósforo si se acumulan.

La caracterización de los residuos orgánicos en Sáchica revela una composición mineral notable, Berek & Hue, (2016) y Guo et al., (2019) afirman que altos contenidos de CaCO_3 (43,46%), K_2O (18,63%) y MgCO_3 (16,63%). Estos elementos indican un fuerte potencial para la formulación de bioabonos alcalinos, ideales para corregir suelos ácidos y mejorar la disponibilidad de nutrientes. Además, el alto nivel de óxido de potasio es especialmente valioso para cultivos exigentes en este macronutriente, como frutales y hortalizas, que requieren potasio para funciones fisiológicas clave. Aunque el contenido de P_2O_5 (0,24%) sigue siendo bajo, como en otros municipios, Beegle, (2017) afirma que este valor puede ser corregido con suplementos externos. Sin embargo, el valor de SO_3 (2,95%), el más alto de los tres municipios, aporta un nivel adecuado de azufre, esencial para la síntesis de aminoácidos y proteínas en las plantas. Por otro lado, las bajas concentraciones de óxidos metálicos como Al_2O_3 , TiO_2 , MnO y Fe_2O_3 reflejan un riesgo reducido de toxicidad y una alta aptitud agronómica. Yi et al., (2023) afirma que esto reduce posibles interferencias con la disponibilidad de otros nutrientes como el fósforo. En conjunto, el perfil mineral de los residuos de Sáchica es muy favorable para el compostaje enriquecido y la producción de biofertilizantes, con una combinación equilibrada de macronutrientes y propiedades correctoras del pH, lo cual fortalece su viabilidad como insumo agrícola sostenible.

FASE 3:

Aldás Sandoval, (2016) señala que la incineración reduce considerablemente el volumen de los residuos y permite aprovechar su poder calorífico para generar energía. Sin embargo, (Lup et al., 2018) señala que factores como la humedad incrementan la temperatura requerida, lo que eleva los costos operativos. Además, uno de los principales retos es el control de las emisiones generadas durante la combustión. Zhang et al., (2004) Afirma que esta tecnología contribuye a disminuir la contaminación del suelo, alargando la vida útil de los rellenos sanitarios. También reduce los lixiviados, lo que disminuye el riesgo de contaminación hídrica y los efectos negativos sobre la salud y el entorno.

Makwana et al., (2023) y Frolov, (2021) proponen la gasificación como una alternativa más adecuada y respetuosa con el medio ambiente, ya que permite convertir los residuos en un gas que puede alimentar motores primarios para la generación de energía. Sin embargo, el incremento en las concentraciones de monóxido de carbono e hidrógeno contribuye a mejorar significativamente su poder energético. Ramírez Rubio et al., (2011) propone que para un mejor rendimiento se

debe disminuir el contenido de humedad en la biomasa, ya que esto mejora la eficiencia del proceso, puesto que la presencia de agua reduce la temperatura de combustión y favorece una mayor generación de alquitranes.

Angeles et al., (2021) y Pivato et al., (2024) respaldan el tratamiento de residuos mediante pirólisis como una alternativa ambientalmente sostenible, al reducir la huella de carbono y fomentar sistemas circulares de gestión de residuos.

Schwartz et al., (2020) y (Chen et al., 2014) afirman que transformar los residuos sólidos urbanos en combustibles líquidos o gaseosos facilita una combustión más limpia que la obtenida mediante la incineración, lo que permite la recuperación de energía y recursos. Que según Klug, (2012) podrían suministrar el calor requerido para el proceso, lo que minimiza la generación de residuos adicionales, limitándose únicamente a gases de escape y cenizas.

De Mora et al., (2024) considera la hidrotermólisis como una alternativa viable para el aprovechamiento de residuos orgánicos y la generación de materiales carbonosos con múltiples aplicaciones. De la Rubia et al., (2018) informo que este presenta algunas limitaciones para lograr una estructura porosa bien desarrollada en dichos materiales, es necesario someterlos a procesos de activación físicos y químicos que implican el uso de altas temperaturas. Janeeshma et al., (2023) y (Chakraborty et al., 2023) proponen el tratamiento de residuos sólidos organicos mediante el uso de enzimas como una estrategia versátil, destacándose por su alta especificidad en procesos catalíticos orientada a la generación de productos de alto valor con aplicaciones relevantes en el ámbito industrial. Esta forma de remediación facilita la descomposición de contaminantes, ya sea de manera directa o indirecta, mediante la alteración de las propiedades fisicoquímicas de los residuos.

7. IMPACTO SOCIAL Y HUMANISTICO.

La implementación de estrategias para el aprovechamiento de residuos orgánicos genera un impacto social positivo al fortalecer la cultura ambiental y promover la participación ciudadana en prácticas sostenibles. La articulación entre comunidad, instituciones y actores productivos mejora la gobernanza ambiental y fomenta la corresponsabilidad. Además, estas acciones impulsan el empleo verde y abren oportunidades en municipios con limitaciones económicas como Sáchica o El Cocuy. Todo esto, a su vez, contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), al evitar la disposición inadecuada de residuos y favorecer su tratamiento sostenible.

Desde una visión humanística, este proyecto dignifica la relación entre las personas y la naturaleza al promover prácticas de valorización de residuos que transforman la percepción del impacto ambiental. Al combinar saberes científicos y tradicionales, especialmente en contextos rurales, se refuerzan valores como el cuidado del suelo, la vida y los alimentos. Estas acciones fomentan una conciencia ética colectiva, fortalecen el sentido de corresponsabilidad y generan aprendizajes significativos que recuperan la confianza en las instituciones, impulsando así sociedades más justas, resilientes y comprometidas con el futuro del planeta.

Se sometió el artículo "Más Allá del RAS: Nuevos Modelos de Proyección de Residuos Sólidos para Estimar la Producción Per Cápita a Nivel Municipal" a la revista Cuaderno Activa estando en Categoría C.



Más Allá del RAS: Nuevos Modelos de Proyección de Residuos Sólidos para estimar la Producción Per Cápita a Nivel Municipal.

Diego Andres Arteaga Zanguña¹, Edinson Fabian Monroy Ávila².

Asimismo, participé como ponente internacional en el Primer Encuentro Internacional de Proyectos de Ingeniería y Procesos Sostenibles, presentando el trabajo titulado "Modelo de análisis de datos para estimar la generación de residuos sólidos a partir de series retrospectivas en Colombia".



Por otro lado, participaré en el VII Congreso Internacional de Ciencias Agrarias y Ambientales – CICA 2025, con la ponencia titulada "Alternativas para el Manejo de Residuos Sólidos Municipales a Nivel Local y su Impacto en la Vida Útil de los Rellenos Sanitarios".



Apreciado autor

Diego Andres Arteaga Zanguña
Universidad Santo Tomas - Seccional Tunja
arteagadiego212@gmail.com

Nos complace informarle que su trabajo titulado: *Alternativas para el Manejo de Residuos Sólidos Municipales a Nivel Local y su Impacto en la Vida Útil de los Rellenos Sanitarios* ha sido **Aprobado**.

8. CONCLUSIONES

Para el municipio de Arcabuco, las estrategias más viables para el tratamiento de residuos son el compostaje, la deshidratación y trituración, y los biocircuitos integrados, al obtener la máxima puntuación en viabilidad ambiental, económica y técnica.

En Sáchica, las tecnologías más viables para el tratamiento de residuos son el compostaje, el vermicompostaje y los biocircuitos integrados, todas con puntuación perfecta en viabilidad ambiental, económica y técnica.

En El Cocuy, las tecnologías más viables para el tratamiento de residuos son el compostaje, la deshidratación y trituración y los biocircuitos integrados, todas con la máxima puntuación en los tres criterios de evaluación. Estas opciones destacan por su bajo impacto ambiental, viabilidad económica y facilidad técnica.

El modelo de Producción Per Cápita (PPC) proyectado para estos municipios supera los valores establecidos por el RAS para municipios de baja complejidad, lo que indica que las proyecciones basadas únicamente en valores fijos del RAS subestiman la realidad de la generación de residuos.

Las proyecciones para 2036 en Arcabuco, El Cocuy y Sáchica evidencian un crecimiento mucho mayor al estimado por el PPC RAS, lo que demuestra que este método no refleja la complejidad de las dinámicas locales. Este hallazgo resalta la necesidad de adoptar modelos predictivos más ajustados a la realidad, permitiendo una planificación más precisa para enfrentar el inminente aumento de residuos.

Los residuos orgánicos de Arcabuco, El Cocuy y Sáchica presentan propiedades químicas favorables para el compostaje, destacándose por su capacidad para corregir el pH, mejorar la estructura del suelo y aportar nutrientes clave. En general de estos residuos respalda su aprovechamiento agrícola, siempre que se apliquen ajustes según el contexto local.

9. RECOMENDACIONES

Se recomienda hacer un análisis químico antes de la deshidratación para ver si este proceso afecta la composición elemental de los residuos orgánicos. Este análisis previo permite establecer una línea base confiable para comparar resultados posteriores y garantizar que los procesos de secado no alteren significativamente la calidad del material destinado a compostaje, digestión anaerobia o producción de bioabonos entre otros.

Según los análisis químicos las concentraciones de nitrógeno son algo bajos para algunos de los procesos descrito, es por ello que se recomienda adicionar compuestos que aporten nitrógeno como gallinaza y abono bovino, para mejorar la presencia de este elemento incondicional en los procesos de elaboración de compost, digestato o abonos orgánicos.

Se recomienda tener en cuenta la necesidad de que la actualización de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) esté soportada en modelos prospectivos que incorporen datos reales para poder establecer una proyección más certera en la generación de residuos.

REFERENCIAS

- Aboulam, S., Morvan, B., & Revel, J.-C. (2006). Use of a rotating-drum pilot plant to model the composting of household waste on an industrial scale. *Compost Science and Utilization*, 14(3), 184-190. Scopus. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2006.10702282>
- Acosta, Y. L., & Abreu, M. C. O. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, XXXIX(1), 35-48.
- Adhikary, S. (2012). *Vermicompost, the story of organic gold: A review*. 2012. <https://doi.org/10.4236/as.2012.37110>
- Ailyn, D. (2025). *Analyzing the Effect of Urbanization on Waste Generation Patterns*.
- Alcaldía de Arcabuco. (2025). *PLAN DE ACCION PLAN DE GESTION INTEGRAL DE RESIDUOS SOLIDOS - PGIRS ARCABUCO - Alcaldía de Arcabuco*. <https://www.arcabuco-boyaca.gov.co/planes/plan-de-accion-plan-de-gestion-integral-de-residuos>
- Alcaldía de El Cocuy. (2025). *PGIRS - Alcaldía Municipal de El Cocuy en Boyacá*. <http://www.elcocuy-boyaca.gov.co/pgirs/pgirs>
- Alcaldía de Sáchica. (2025). *PGIRS - Alcaldía Municipal de Sáchica—Boyacá*. <http://www.sachica-boyaca.gov.co/normatividad/decreto-021-2025>
- Aldás Sandoval, M. B. (2016). Incineración de la fracción biodegradable de los residuos sólidos urbanos. *Cumbres*, 2(2), 9-15.
- Alea González, L. D., Marín Cuba, L. G., & Bruguera Amarán, N. (2019). Diagnóstico de la gestión del reciclaje de los residuos sólidos generados en el destino turístico Viñales. *Avances: Cuba*, 21(4), 516-531.
- Angeles, W. G., López, R. Y. R., Rascón, J., Gurbillón, M. Á. B., Ramirez, C. M. O., Oliva, M., & Santillan, Y. M. (2021). Valorización energética de residuos orgánicos mediante pirolisis. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 5(2), Article 2. <https://doi.org/10.25127/aps.20212.766>
- Arbulú, I., Rey-Maqueira, J., & Sastre, F. (2024). The impact of TOURISM and seasonality on different types of municipal solid waste (MSW) generation: The case of Ibiza. *Heliyon*, 10(13), e33894. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33894>
- Bedoya Jiménez, A. M. (2023). Reflexiones frente a los rellenos sanitarios en Colombia: Impacto, tratamiento y pautas para la mitigación de los daños ambientales. *Revista Jurídica Mario Alario D'Filippo*, 15(30), 277-288. <https://doi.org/10.32997/2256-2796-vol.15-num.30-2023-4249>
- Beegle, D. (2017). *Managing Phosphorus for Crop Production*. <https://extension.psu.edu/managing-phosphorus-for-crop-production>
- Bello Parra, M. A., & Martinez Castaño, Y. (2016). *Estado del arte de las investigaciones sobre la disposición de los residuos sólidos en Cundinamarca*. <http://hdl.handle.net/11396/5305>
- Benitez-Bravo, R., Gomez-González, R., Rivas-García, P., Botello-Álvarez, J. E., Huerta-Guevara, O. F., García-León, A. M., & Rueda-Avellaneda, J. F.

- (2021). Optimization of municipal solid waste collection routes in a Latin-American context. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 71(11), 1415-1427. <https://doi.org/10.1080/10962247.2021.1957040>
- Berek, A., & Hue, N. (2016). Characterization of Biochars and Their Use as an Amendment to Acid Soils. *Soil Science*, in press. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000177>
- Berríos–Godoy, M. R. (2015). Potencial Energético Contenido En Los Residuos Sólidos Urbanos. Realidad Brasileña. *GEOSABERES: Revista de Estudos Geoeducacionais*, 6(3), 479-491.
- Bhattacharyya, P., Chakraborty, A., Bhattacharya, B., & Chakrabarti, K. (2003). Evaluation of msw compost as a component of integrated nutrient management in wetland rice. *Compost Science and Utilization*, 11(4), 343-350. Scopus. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2003.10702144>
- Brinton, W. F., Evans, E., & Blewett, C. (2008). Extractability, Plant Yield and Toxicity Thresholds for Boron in Compost. *Compost Science and Utilization*, 16(2), 114-118. Scopus. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2008.10702365>
- Carvajal Romero, H., Teijeiro Álvarez, M., García Álvarez, M. T., Carvajal Romero, H., Teijeiro Álvarez, M., & García Álvarez, M. T. (2022). Análisis de la gestión de los residuos sólidos urbanos en Europa. *Revista Universidad y Sociedad*, 14(1), 402-415.
- Cerna-Cueva, A. F., Rosas-Echevarría, C., Perales-Flores, R., Ataucusi-Flores, P. L., Cerna-Cueva, A. F., Rosas-Echevarría, C., Perales-Flores, R., & Ataucusi-Flores, P. L. (2022). Predicción de la generación de residuos sólidos domiciliarios con machine learning en una zona rural de Puno. *Tecnia*, 32(1), 44-52. <https://doi.org/10.21754/tecnia.v32i1.1378>
- Chacon Amado, K. D. (2021). *Formulación de un plan para la gestión y el aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos en el municipio de Sáchica, Boyacá, Ecoparque «Hitchawaia»*. <http://hdl.handle.net/11634/31391>
- Chakraborty, D., Chatterjee, S., Althuri, A., Palani, S. G., & Venkata Mohan, S. (2023). Sustainable enzymatic treatment of organic waste in a framework of circular economy. *Bioresource Technology*, 370, 128487. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128487>
- Chávez, A. Y., & Moya, F. V. (2019). Enfoques innovadores de educación ambiental con el aprovechamiento de residuos orgánicos urbanos. *Cátedra*, 2(2), Article 2. <https://doi.org/10.29166/catedra.v2i2.1639>
- Chen, D., Yin, L., Wang, H., & He, P. (2014). Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. *Waste Management*, 34(12), 2466-2486. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.004>
- Contreras Ortiz, Y. (2021). *N.28 Gestión de residuos sólidos en América Latina: ¿hacia una economía circular? - Instituto de Estudios Urbanos*. <https://ie.u.unal.edu.co/publicacion/n-28-gestion-de-residuos-solidos-en-america-latina-hacia-una-economia-circular/>
- CORPOBOYACA. (2022, octubre 29). *Gestión Integral de Residuos Sólidos y Peligrosos*. Corpoboyacá. <https://www.corpoboyaca.gov.co/vigente/gestion-integral-de-residuos-solidos-y-peligrosos/>

- Czekala, W. (2022). Digestate as a Source of Nutrients: Nitrogen and Its Fractions. *Water*, 14(24), Article 24. <https://doi.org/10.3390/w14244067>
- De Anda Trasviña, A., García Galindo, E., Peña Castañón, A. Z., Seminario Peña, J. V., & Nieto Garibay, A. (2021, julio 7). *Residuos orgánicos: ¿basura o recurso?* [https://www.cibnor.gob.mx/revistas-rns/pdfs/vol1num3EE/3_RESIDUOS.pdf](https://www.cibnor.gob.mx/revistas/rns/pdfs/vol1num3EE/3_RESIDUOS.pdf) ISSN: 2448-7406 DOI: <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2021.07.07.03.0004>
- De la Rubia, M. A., Díaz, E., Gómez Herrero, E., Manzano, J., & Marín Batista, J. D. (2018). *Aplicación de la carbonización hidrotermal para la valoración de lodos de EDAR y otros residuos*. <https://www.aguasresiduales.info/revista/articulos/aplicacion-de-la-carbonizacion-hidrotermal-para-la-valoracion-de-lodos-de-edar-y-otros-residuos>
- de Mora, A., Diaz de Tuesta, J. L., Pariente, M. I., Segura, Y., Puyol, D., Castillo, E., Lissitsyna, K., Melero, J. A., & Martínez, F. (2024). Chemically activated hydrochars as catalysts for the treatment of HTC liquor by catalytic wet air oxidation. *Catalysis Today*, 429, 114462. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2023.114462>
- Delance, J. J. (2024, enero 15). Una preocupación global y compleja: Crecimiento poblacional y recursos naturales. *Revista GLOBAL*. <https://revistaglobal.org/una-preocupacion-global-y-compleja-crecimiento-poblacional-y-recursos-naturales/>
- Delgado Arroyo, M. del M., Mendoza López, K. L., González, M. I., Tadeo Lluch, J. L., Martín Sánchez, J. V., Delgado Arroyo, M. del M., Mendoza López, K. L., González, M. I., Tadeo Lluch, J. L., & Martín Sánchez, J. V. (2019). EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COMPOSTAJE DE RESIDUOS AVÍCOLAS EMPLEANDO DIFERENTES MEZCLAS DE SUSTRATOS. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 35(4), 965-977. <https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.04.15>
- Denafas, G., Ruzgas, T., Martuzevicius, D., Shmarin, S., Hoffmann, M., Mykhaylenko, V., Ogorodnik, S., Romanov, M., Neguliaeva, E., Chusov, A., Turkadze, T., Bochoidze, I., & Ludwig, C. (2014). Seasonal variation of municipal solid waste generation and composition in four East European cities. *Resources, Conservation and Recycling*, 89, 22-30. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.06.001>
- Díaz Fariña, E., Díaz-Hernández, J., & Padrón, N. (2020). The contribution of tourism to municipal solid waste generation: A mixed demand-supply approach on the island of Tenerife. *Waste management (New York, N.Y.)*, 102. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.023>
- Díaz, L. A. P., Saiz, J. S., & Quezada, H. T. (2024). Preparación de muestras sólidas para el análisis por fluorescencia de rayos X: Una revisión. *Revista Colombiana de Química*, 21-40. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v52n3.111499>

- Diorio, L., Forchiassin, F., Papinutti, L., & Viviana, D. (2003). *Actividad enzimática y degradación de diferentes tipos de residuos orgánicos por Saccobolus saccoboloides (Fungi, Ascomycotina)*.
- DNP. (2022, mayo 27). *Guía virtual para que los colombianos mejoren la separación de residuos sólidos y cuiden el medio ambiente*. <https://2022.dnp.gov.co:443/Paginas/gobierno-lanza-guia-virtual-para-sparacion-de-residuos-solidos.aspx>
- Egea-Ronda, A., del Campo-Giménez, M., Egea-Ronda, A., & del Campo-Giménez, M. (2023). Estilos de vida, sostenibilidad y salud planetaria. *Revista Clínica de Medicina de Familia*, 16(2), 106-115. <https://doi.org/10.55783/rcmf.160208>
- Fonseca Figueroa, A. P. (2023). *Alternativas para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos-RSO en Bogotá: Enfoque de economía circular* [Trabajo de grado - Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/85054>
- Frolov, S. M. (2021). Organic Waste Gasification: A Selective Review. *Fuels*, 2(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/fuels2040033>
- Gaviria-Cuevas, J. F. (2019). Estudio de las tendencias de investigación con respecto al tratamiento y aprovechamiento de los residuos sólidos municipales: Un análisis bibliométrico aplicado. *Renewable energy, biomass & sustainability*, 1(1), Article 1. <https://doi.org/10.56845/rebs.v1i1.4>
- Gelvez Pabón, M. I. (2023). *Análisis estratégico de los factores que inciden en la generación y aprovechamiento de los residuos sólidos en el sector manufacturero en Colombia* [Master thesis, Universidad de La Sabana]. <https://intellectum.unisabana.edu.co/handle/10818/59535>
- Głąb, T., Gondek, K., & Mierzwa-Hersztek, M. (2025). Enhancing Soil Physical Quality with Compost Amendments: Effects of Particle Size and Additives. *Agronomy*, 15(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/agronomy15020458>
- Granzotto, F., Brächer, E. H., Mayer, F. D., Hoffmann, R., & Silveira, D. D. da. (2023). Actualización de los procesos de digestión anaeróbica de residuos orgánicos. *AUGM DOMUS*, 10, Article 10. <https://doi.org/10.24215/18522181e007>
- Grau, J., Terraza, H., Velosa, D. M. R., Rihm, A., & Sturzenegger, G. (2015). Situación de la gestión de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *IDB Publications*. <https://doi.org/10.18235/0006297>
- Greenfield, E. (2024, enero 20). Efectos del crecimiento demográfico en el medio ambiente. *Sigma Earth*. <https://sigmaearth.com/es/efectos-del-crecimiento-demografico-sobre-el-medio-ambiente/>
- Guerra, A. R., & Baca-Cajas, K. A. (2022). Generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU): Análisis de una década de gestión en países de Europa y América. *Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas*, 43(1), Article 1. <https://doi.org/10.26807/remcb.v43i1.919>
- Guo, A., Ding, L., Tang, Z., Zhao, Z., & Duan, G. (2019). Respuesta microbiana a la aplicación de CaCO₃ en un suelo ácido del sur de China. *Journal of*

- Environmental Sciences*, 79, 321-329.
<https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.12.007>
- IBERDROLA. (2024). *La evolución de la población mundial y su impacto en el futuro del planeta*. Iberdrola. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/evolucion-poblacion-mundial>
- Janeeshma, E., Habeeb, H., Sinha, S., Arora, P., Chattaraj, S., Das Mohapatra, P., Panneerselvam, P., & Mitra, D. (2023). Enzymes-mediated solid waste management: A sustainable practice for recycling. *Waste Management Bulletin*. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.10.007>
- Janeeshma, E., Habeeb, H., Sinha, S., Arora, P., Chattaraj, S., Mohapatra, P. K. D., Panneerselvam, P., & Mitra, D. (2024). Enzymes-mediated solid waste management: A sustainable practice for recycling. *Waste Management Bulletin*, 1(4), 104-113. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.10.007>
- Jaramillo Henao, G., & Zapata Márquez, L. M. (2008). *Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia*. <http://hdl.handle.net/10495/45>
- Jiang, T., Schuchardt, F., Li, G., Guo, R., & Zhao, Y. (2011). Effect of C/N ratio, aeration rate and moisture content on ammonia and greenhouse gas emission during the composting. *Journal of Environmental Sciences*, 23(10), 1754-1760. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60591-8](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60591-8)
- Kashmanian, R., & Spencer, R. (2013). Cost Considerations of Municipal Solid Waste Compost: Production versus Market Price. *Compost Science & Utilization*, 1, 20-37. <https://doi.org/10.1080/1065657X.1993.10771124>
- Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., & Dawson, L. (2011). The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management*, 31(8), 1737-1744. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.021>
- Khalilian, A., Sullivan, M. J., Mueller, J. D., Shiralipour, A., Wolak, F. J., Williamson, R. E., & Lippert, R. M. (2002). Effects of surface application of MSW compost on cotton production—Soil properties, plant responses, and nematode management. *Compost Science and Utilization*, 10(3), 270-279. Scopus. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2002.10702089>
- Khan, F., Siddique, A. B., Shabala, S., Zhou, M., & Zhao, C. (2023). Phosphorus Plays Key Roles in Regulating Plants' Physiological Responses to Abiotic Stresses. *Plants*, 12(15), 2861. <https://doi.org/10.3390/plants12152861>
- Klug, M. (2012). Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. *Revista de Química*, 26(1-2), 37-40.
- Lamprea Zona, M. C., & Olmedo Meza, A. M. (2023). Experiencia en la producción de Bocashi, como acondicionador de suelo para la producción de marañón (anacardium occidentale) industrial en la finca Namasté. *CITAS: Ciencia, innovación, tecnología, ambiente y sociedad*, 9(2), 1.
- Lapuerta, M., Hernández, J. J., Pazo, A., & López, J. (2008). Gasification and co-gasification of biomass wastes: Effect of the biomass origin and the gasifier operating conditions. *Fuel Processing Technology*, 89(9), 828-837. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.02.001>
- Lee, L. X., Haslan, H. A., Tan, P. Q., Mohamed Fauzi, N. F. E., Roslan, A. M., Ariffin, H., Mohd Yusoff, M. Z., Ramli, N., & Abdul-Mutalib, N.-A. (2025).

- Physicochemical changes and emissions impact during co-composting of grease trap solid waste and rice husk. *International Journal of Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06634-8>
- Li, M., Kang, E., Wang, J., Yan, Z., Zhang, K., Hu, Z., & Kang, X. (2021). Phosphorus accumulation poses less influence than soil physicochemical properties on organic phosphorus adsorption on ferrasol. *Geoderma*, 402, 115324. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115324>
- Liang, C., Das, K. C., & McClendon, R. W. (2003). The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. *Bioresource Technology*, 86(2), 131-137. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00153-0](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00153-0)
- López Callejas, C. M., & López, J. M. (2019). *Implementación de un Mecanismo de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos para el Hogar Infantil Personitas de Tunja (Boyacá)*. <http://repository.unad.edu.co/handle/10596/26433>
- Lup, D., Stroe, A., Chezan, P., & Pica, E. (2018). The Importance of Waste Incineration. *Studia Universitatis Babeş-Bolyai Ambientum*, 63, 43-48. <https://doi.org/10.24193/subbambientum.2018.1.04>
- Makwana, J., Dhass, A. D., Ramana, P. V., Sapariya, D., & Patel, D. (2023). An analysis of waste/biomass gasification producing hydrogen-rich syngas: A review. *International Journal of Thermofluids*, 20, 100492. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100492>
- MANUAL DE COMPOSTAJE DEL AGRICULTOR de la FAO. (2013). *Manual de compostaje del agricultor- FAO*.
- Marquez Rodriguez, O. J., Obando Muñoz, G. A., & Acevedo Gaitan, G. A. (2019). *Definición de alternativas viables y sostenibles para la gestión y aprovechamiento de residuos alimenticios provenientes de diferentes fuentes generadoras de residuos orgánicos en el Municipio de Cajica – Cundinamarca*. [Corporación Universitaria Minuto de Dios.]. <https://hdl.handle.net/10656/9883>
- Martínez Sepúlveda, J. (2015). Use and valorization of Organic Fraction of Municipal Solid Waste in Colombia for sustainable development. *Revista ONTARE*, 1, 243-254. <https://doi.org/10.21158/23823399.v1.n2.2013.1230>
- Mateu-Sbert, J., Ricci-Cabello, I., Villalonga-Olives, E., & Cabeza-Irigoyen, E. (2013). The impact of tourism on municipal solid waste generation: The case of Menorca Island (Spain). *Waste Management (New York, N.Y.)*, 33(12), 2589-2593. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.08.007>
- Méndez-Novelo, R. I., Chan-Gutiérrez, E. A., Castillo-Borges, E. R., Vázquez-Borges, E. R., & Espadas-Solís, A. E. (2012). Digestión anaerobia de efluentes de fosas sépticas. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 13(3), 339-349.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2023). *Estrategia Nacional de Economía Circular* -. <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/estrategia-nacional-de-economia-circular/>

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2024). *Ley 2169 de 2021*. <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/ley-2169-de-2021/>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2023). *Basura cero | Minvivienda*. <https://www.minvivienda.gov.co/basura-cero>
- Miranda, M. E. (2011). El Fenómeno Actual de Sobrepoblación Humana y los Retos que Plantea la Situación Demográfica para el Perú. *Derecho & Sociedad*, 37, 325-330.
- Mngomezulu, S., Mbanga, S., & Adeniran, A. (2024). The factors influencing waste management for economic development—The perspective of Nelson Mandela bay municipality residents. *Frontiers in Sustainability*, 5. <https://doi.org/10.3389/frsus.2024.1469207>
- Moeller, J., & Reeh, U. (2003). Degradation of dehp, pahs and las in source separated msw and sewage sludge during composting. *Compost Science and Utilization*, 11(4), 370-378. Scopus. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2003.10702147>
- Monroy Ávila, E. F. (2025, julio 24). Se acaba la vida útil de los rellenos sanitarios y Boyacá no avanza en tratamiento de Residuos. *Tomás Noticias - Santoto Stereo*. <https://santotostereo.co/rellenos-sanitarios/>
- Monroy Ávila, E. F., & Díaz Guevara, D. R. (2025). *Logros de Sostenibilidad: Modelo circular en la gestión de residuos sólidos municipales* (pp. 129-143). <https://doi.org/10.61728/AE20251895>
- Montemurro, F., & Maiorana, M. (2007). Nitrogen utilization, yield, quality and soil properties in a sugarbeet crop amended with municipal solid waste compost. *Compost Science and Utilization*, 15(2), 84-92. Scopus. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2007.10702317>
- Morais, L., Nascimento, V., Simões, S., & Ometto, J. (2021). Regional Distance Routes Estimation for Municipal Solid Waste Disposal, Case Study São Paulo State, Brazil. *Energies*, 14(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/en14133964>
- Morozova, I., Nikulina, N., Oechsner, H., Krümpel, J., & Lemmer, A. (2020). Effects of Increasing Nitrogen Content on Process Stability and Reactor Performance in Anaerobic Digestion. *Energies*, 13(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/en13051139>
- Mosallanejad, S., Dlugogorski, B. Z., Kennedy, E. M., & Stockenhuber, M. (2018). On the Chemistry of Iron Oxide Supported on γ -Alumina and Silica Catalysts. *ACS Omega*, 3(5), 5362-5374. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b00201>
- Mula, J. A. (2012, septiembre 24). *Relación Carbono-Nitrógeno en el compost—Agromática*. <https://www.agromatica.es/relacion-cn-en-el-compost/>
- Muñoz Rodríguez, S., Peña Montaña, I. V., & Zamora Leal, V. (2023). *Metodologías innovadoras para el aprovechamiento de residuos en Colombia*. <http://hdl.handle.net/10882/12794>
- Naranjo Bedoya, B. A., & Alejandro, B. (2024). *Propuesta para la producción de compostaje a partir de los residuos vegetales generados por una empresa de silvicultura de la ciudad de Medellín-Antioquia*. <http://repository.unad.edu.co/handle/10596/62904>

- Nguyen, T.-P., Koyama, M., & Nakasaki, K. (2023). Effect of oxygen deficiency on organic matter decomposition during the early stage of composting. *Waste Management*, 160, 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.01.034>
- Odales Bernal, L., López Dávila, E., López González, L., Jiménez Hernández, J., & Barrera Cardoso, E. L. (2020). Potencial biofertilizante del digestato obtenido en plantas de biogás a pequeña escala en el contexto cubano. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 37(2), 14-26. <https://doi.org/10.22267/rcia.203702.134>
- Olivera Murcia, S. (2022). *Alternativas para la realización de compostaje a partir de residuos orgánicos generados en las veredas Marayal y San Miguel, municipio de Cubarral, departamento del Meta, en el marco de una revisión bibliográfica*. <http://repository.unad.edu.co/handle/10596/48564>
- ONU. (2022, enero 9). *Economía Circular de los residuos orgánicos para la ciudad y el campo*. One Planet network. <https://www.oneplanetnetwork.org/knowledge-centre/resources/economia-circular-de-los-residuos-organicos-para-la-ciudad-y-el-campo>
- ONU, O. (2024, julio 11). *Informe de perspectivas de población*, ONU. <https://news.un.org/es/story/2024/07/1531126>
- Osorio Gómez, V. (2024). *Mitigación de la huella de carbono mediante digestión anaerobia en un municipio rural de Colombia* [Trabajo de grado - Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/86192>
- Parra Huertas, R. A. (2015). Digestión anaeróbica: Mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Producción + Limpia*, 10(2), 142-159.
- Passoni, M., & Borin, M. (2009). Effects of Different Composts on Soil Nitrogen Balance and Dynamics in a Biennial Crop Succession. *Compost Science and Utilization*, 17(2), 108-116. Scopus. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2009.10702409>
- Penagos Vargas, J. W., Adarraga Buzón, J., Aguas Vergara, D., & Molina, E. (2011). Reducción de los Residuos Sólidos Orgánicos en Colombia por medio del Compostaje Líquido. *Ingeniare*, 11, 37-44.
- Petrović, J., Ercegovic, M., Simić, M., Koprivica, M., Dimitrijević, J., Jovanovic, A., & Janković Pantić, J. (2024). Hydrothermal Carbonization of Waste Biomass: A Review of Hydrochar Preparation and Environmental Application. *Processes*, 12, 207. <https://doi.org/10.3390/pr12010207>
- Pivato, A., Gohar, H., Antille, D. L., Schievano, A., Beggio, G., Reichardt, P., Maria, F. D., Peng, W., Castegnaro, S., & Lavagnolo, M. C. (2024). Air-Polluting Emissions from Pyrolysis Plants: A Systematic Mapping. *Environments*, 11(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/environments11070149>
- Pomare Lever, B. R., Pomare Lever, A., & Barbin Rebolledo, R. S. (2025). *El compostaje comunitario como estrategia de economía circular para el aprovechamiento de los residuos orgánicos en Colombia*. <https://repositorio.unimagdalena.edu.co/handle/123456789/22842>
- Press, C., Mahaffee, W., Edwards, J. H., & Kloepper, J. (2013). Organic By-Product Effects on Soil Chemical Properties And Microbial Communities. *Compost*

- Science & Utilization*, 4, 70-80.
<https://doi.org/10.1080/1065657X.1996.10701832>
- Ramírez Rubio, S., Sierra, F. E., & Guerrero, C. A. (2011). Gasificación de materiales orgánicos residuales. *Ingeniería e Investigación*, 31(3), 17-25.
- Rendón Muñoz, L. I. (2017). *Formulación de opciones tecnológicas de gestión de biorresiduos residenciales en grandes centros urbanos*.
https://redcol.minciencias.gov.co/Record/REPOUAO2_e014afc1ace2c20c7201cd979e937c14/Description#tabnav
- Rieder Martinez, C. (2021). *Aprèn—Propuesta de compostaje comunitario en Santa Isabel Cholula (México) y en Sant Jaume Sesoliveres (Catalunya)*.
https://apren.upc.edu/es/materials/2117_349217
- Rivas-Nichorzon, M., & Silva-Acuña, R. (2020). Calidad física y química de tres compost, elaborados con residuos de jardinería, pergamino de café y bora (*Eichhornia Crassipes*). *Revista Ciencia Unemi*, 13(32), 87-100.
- Roa, M. M. (2022, marzo 29). *Infografía: Un mundo de residuos*. Statista Daily Data.
<https://es.statista.com/grafico/27140/desechos-solidos-municipales-generados-per-capita-al-ano>
- Rocha Niño, J. A., & Rodríguez Bolaños, M. J. (2024). *Análisis de producción de energía sostenible por medio de termovalorización de residuos sólidos urbanos*. <https://repository.udistrital.edu.co/items/0900e0f3-0f2d-470f-b4b9-378d5536816b>
- Rodrigo Ilarri, J., & Rodrigo Clavero, M. E. (2025). *Propiedades físicas de los residuos sólidos urbanos*. <https://riunet.upv.es/handle/10251/221477>
- Rodríguez Escobar, L. ángela. (2002). Hacia la gestión ambiental de residuos sólidos en las metrópolis de América Latina. *Innovar*, 12(20), 111-120.
- Rodríguez Guerra, A., & Baca Cajas, K. A. (2022). Generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU): Análisis de una década de gestión en países de Europa y América. *Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas: REMCB*, 43(1 (Mayo)), 49-61.
- Rodríguez Martín, C. M. (2021). *Análisis de la aportación al autoabastecimiento energético del CH₃OH obtenido a partir de la gasificación inicial de residuos*.
<https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/25461>
- Rojas Avendaño, M. C. (2022). *Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos para la generación energía en Bogotá*.
<https://hdl.handle.net/20.500.11839/8899>
- Romero, G. (2024, septiembre 12). *La gestión de residuos a escala global: Presente y futuro*. RETEMA - Revista Técnica de Medio Ambiente.
<https://www.retema.es/articulos-reportajes/la-gestion-de-residuos-escala-global-presente-y-futuro>
- Sabater Vidal, M. (2022). *El impacto del turismo en la generación de residuos sólidos urbanos en la isla de Mallorca*.
<http://dspace.uib.es/xmlui/handle/11201/159080>
- Sáez, A., & G, J. A. U. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia*, 20(3), 121-135.

- Sánchez, N. G., & Rojas Vargas, J. (2015). *Manual Composteras*. <https://documentos.una.ac.cr/handle/unadocs/3818>
- Sanciolo, P., Rivera, E., Navaratna, D., & Duke, M. C. (2022). Food Waste Diversion from Landfills: A Cost–Benefit Analysis of Existing Technological Solutions Based on Greenhouse Gas Emissions. *Sustainability*, 14(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/su14116753>
- Sayara, T., Basheer-Salimia, R., Hawamde, F., & Sánchez, A. (2020). Recycling of Organic Wastes through Composting: Process Performance and Compost Application in Agriculture. *Agronomy*, 10(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111838>
- Schwartz, N. R., Paulsen, A. D., Blaise, M. J., Wagner, A. L., & Yelvington, P. E. (2020). Analysis of emissions from combusting pyrolysis products. *Fuel*, 274, 117863. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117863>
- Secretaría de Planeación Boyacá. (2020). *Gobierno y Asamblea de Boyacá consolidan Plan de Desarrollo 2020-2023*. <https://planeacion.boyaca.gov.co/gobierno-y-asamblea-de-boyaca-consolidan-plan-de-desarrollo-2020-2023/>
- Secretaría de Planeación Boyacá. (2022). *Importantes resultados deja el proyecto Boyacá Bio para el departamento | Secretaría de Planeación Boyacá*. <https://planeacion.boyaca.gov.co/importantes-resultados-deja-el-proyecto-boyaca-bio-para-el-departamento/>
- Segura, Á. M., Rojas, L. A., & Pulido, Y. A. (2020). *Referentes mundiales en sistemas de gestión de residuos sólidos*. <http://localhost:8080/xmlui/handle/654321/9377>
- Sturzenegger, G. (2014, mayo 16). ¿Sabes cuánta basura generas en un día? *Volvamos a la fuente*. <https://blogs.iadb.org/agua/es/sabes-cuanta-basura-generas-en-un-dia/>
- SUPERSERVICIOS. (2024, mayo 17). *El cambio en el modelo de aseo es urgente por situación de los rellenos sanitarios en Colombia: Superservicios | Superintendencia Servicios Públicos Domiciliarios*. <https://www.superservicios.gov.co/Sala-de-prensa/noticias/el-cambio-en-el-modelo-de-aseo-es-urgente-por-situacion-de-los-rellenos-sanitarios-en-colombia-superservicios>
- Tchobanoglous, G., Theissen, H., & Eliassen, R. (1982). *Desechos sólidos, principios de ingeniería y administración*. Pdfcoffee.Com. <https://pdfcoffee.com/chocolombia-george-tchobanoglous-hilary-theissen-rolf-eliassen-desechos-solidos-principios-de-ingenieria-y-administracion-1982pdf-pdf-free.html>
- Torres-Calderón, S., Paucar-Palomino, M. J., Pampa-Quispe, N. B., Torres-Calderón, S., Paucar-Palomino, M. J., & Pampa-Quispe, N. B. (2020). Adsorción de sulfuro de hidrógeno del biogás mediante virutas de hierro pretratadas para reuso energético. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 41(1), 18-29.
- Tortosa, G. (2018, abril 16). La importancia de la relación carbono-nitrógeno en un compost. *Compostando Ciencia*.

- <https://www.compostandociencia.com/2018/04/la-importancia-de-la-relacion-carbono-nitrogeno-en-un-compost/>
- UAESP. (2022). *La UAESP recibió 2.475 millones de pesos por parte de Biogás Colombia | Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos -UAESP*. <https://www.uaesp.gov.co/noticias/la-uaesp-recibio-2475-millones-pesos-parte-biogas-colombia>
- Ulloa Cuzco, J. I. (2005). *Los Rellenos Sanitarios*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/8677>
- UNEP. (2024, febrero 25). *Perspectiva Mundial de la Gestión de Residuos 2024 | UNEP - UN Environment Programme*. <https://www.unep.org/es/resources/perspectiva-mundial-de-la-gestion-de-residuos-2024>
- Uribe, J. J. G., & Muñoz, M. del P. S. (2017). TURISMO SOSTENIBLE Y RESIDUOS SÓLIDOS: UNA PRIMERA APROXIMACIÓN AL ESTADO DEL ARTE. *Crece Empresarial Journal of Management and Development*, 1, Article 1. <https://journalusco.edu.co/index.php/cempresarial/article/view/1568>
- US EPA. (2019, marzo 18). *How Does Anaerobic Digestion Work?* [Overviews and Factsheets]. <https://www.epa.gov/agstar/how-does-anaerobic-digestion-work>
- US EPA, R. 01. (2020, marzo 8). *Composting Food Waste: Keeping a Good Thing Going* (Massachusetts) [Speeches, Testimony and Transcripts]. <https://www.epa.gov/snep/composting-food-waste-keeping-good-thing-going>
- Valencia Echeverri, M. (2022). *Estado y posibles mejoras para los rellenos sanitarios de la jurisdicción de Cornare*. https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav. <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923> https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDEA2_369bd83f36e9a28002dc4c20f3e9d8af/Description#tabnav <https://hdl.handle.net/10495/31923>

- Wang, S., & Wu, Y. (2021). Hyperthermophilic Composting Technology for Organic Solid Waste Treatment: Recent Research Advances and Trends. *Processes*, 9, 675. <https://doi.org/10.3390/pr9040675>
- Wang, Z., Chen, Z., Jiang, S., Jin, H., Chen, R., Wu, S., Fan, C., Zhao, M., Gong, X., Xu, M., & Zheng, X. (2025). Improvement of metabolic heat accumulation for hyperthermophilic composting system: Influencing factors and microbial communities. *Environmental Sciences Europe*, 37(1), 74. <https://doi.org/10.1186/s12302-025-01116-7>
- Wikurendra, E. A., Syafiuddin, A., Herdiani, N., & Nurika, G. (2023). *Forecast of Waste Generated and Waste Fleet using Linear Regression Model*. <https://doi.org/10.15244/pjoes/158779>
- Yang, Y., Zhou, T., Cheng, M., Xie, M., Shi, N., Liu, T., Huang, Z., Zhao, Y., Huang, Q., Liu, Z., & Li, B. (2024). Recent advances in organic waste pyrolysis and gasification in a CO₂ environment to value-added products. *Journal of Environmental Management*, 356, 120666. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120666>
- Ye, Y., Guo, W., Ngo, H. H., Wei, W., Cheng, D., Bui, X. T., Hoang, N. B., & Zhang, H. (2024). Biofuel production for circular bioeconomy: Present scenario and future scope. *Science of The Total Environment*, 935, 172863. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172863>
- Yeh, C. K., Lin, C., Shen, H. C., Cheruiyot, N. K., Camarillo, M. E., & Wang, C. L. (2020). Optimizing Food Waste Composting Parameters and Evaluating Heat Generation. *Applied Sciences*, 10(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/app10072284>
- Yi, C., Zhu, J., Chen, L., Huang, X., Wu, R., Zhang, H., Dai, X., & Liang, J. (2023). Speciation of Iron and Aluminum in Relation to Phosphorus Sorption and Supply Characteristics of Soil Aggregates in Subtropical Forests. *Forests*, 14(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/f14091804>
- Yogalakshmi, K. N. (2019). *Factores que influyen en la generación de residuos, riesgos ambientales y para la salud – Gestión de Residuos Sólidos y Peligrosos*. <https://ebooks.inflibnet.ac.in/esp11/chapter/factors-influencing-waste-generation-environmental-and-health-hazards/>
- Zhang, S., Herbell, J.-D., & Gaye, B. (2004). Biodegradable organic matter in municipal solid waste incineration bottom ash. *Waste management (New York, N.Y.)*, 24, 673-679. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.03.009>

ANEXOS I

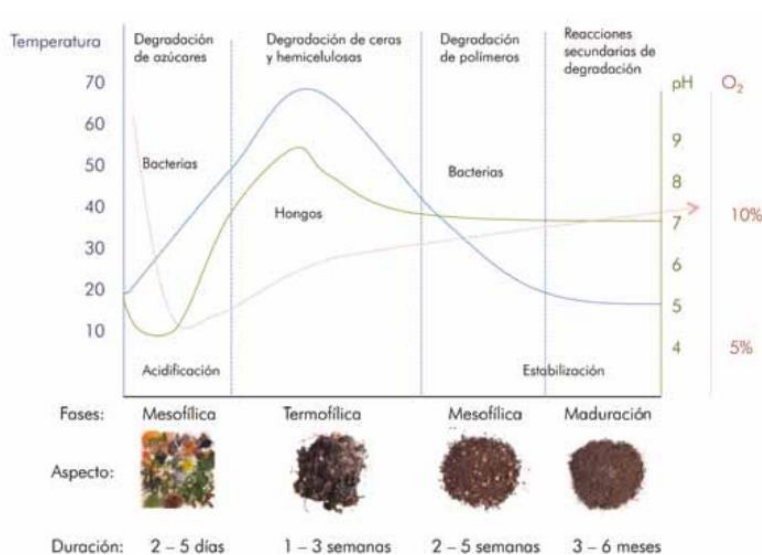
Element/Compound	ARCABUCO 1		ARCABUCO 2		Promedio Arcabuco
	99 (%)	100 (%)	101 (%)	102 (%)	
Al ₂ O ₃	10.78	3.19	12.3	7	8.32
SiO ₂	39.92	9.88	53.58	28.34	32.93
P ₂ O ₅	1.3	0	2.02	2.46	1.45
SO ₃	1.7	2.21	0.96	1.65	1.63
K ₂ O	11.73	10.74	7.34	12.51	10.58
CaCO ₃	20.26	55.46	10.34	30.57	29.16
TiO ₂	0.35	0.57	0.76	0.61	0.57
MnO	0.15	0.39	0.17	0.18	0.22
Fe ₂ O ₃	2.47	4.51	6.3	5.75	4.76
MgCO ₃	11.34	13.06	6.24	10.93	10.39

Element/Compound	COCUY 1		COCUY 2		Promedio El Cocuy
	103 (%)	104 (%)	105 (%)	106 (%)	
Al ₂ O ₃	4.53	4.24	6.49	6.49	5.44
SiO ₂	21.94	21.03	28.59	28.59	25.04
P ₂ O ₅	0	0	0.26	0.26	0.13
SO ₃	4.03	1.59	2.79	2.79	2.80
K ₂ O	6.97	4.29	9.3	9.3	7.47
CaCO ₃	53.61	61.32	23.77	23.77	40.62
TiO ₂	0.59	0.43	0.56	0.56	0.54
MnO	0.11	0.08	0.17	0.17	0.13
Fe ₂ O ₃	3.79	2.71	3.12	3.12	3.19
MgCO ₃	4.42	4.3	24.95	10.07	10.94

Element/Compound	SACHICA 1		SACHICA 2		Promedio Sáchica
	107 (%)	108 (%)	109 (%)	110 (%)	
Al ₂ O ₃	4.47	5.31	4.56	3.47	4.45
SiO ₂	8.63	13.26	7.62	12.7	10.55
P ₂ O ₅	0.58	0.36	0	0	0.24
SO ₃	3.59	2.6	2.81	2.81	2.95
K ₂ O	21.83	20.01	22	10.66	18.63
CaCO ₃	42.98	36.85	42.9	51.09	43.46
TiO ₂	0.23	0.42	0.19	0.51	0.34
MnO	0.15	0.13	0.14	0.1	0.13
Fe ₂ O ₃	3.08	3.3	2.04	2.43	2.71
MgCO ₃	14.74	17.78	17.76	16.22	16.63

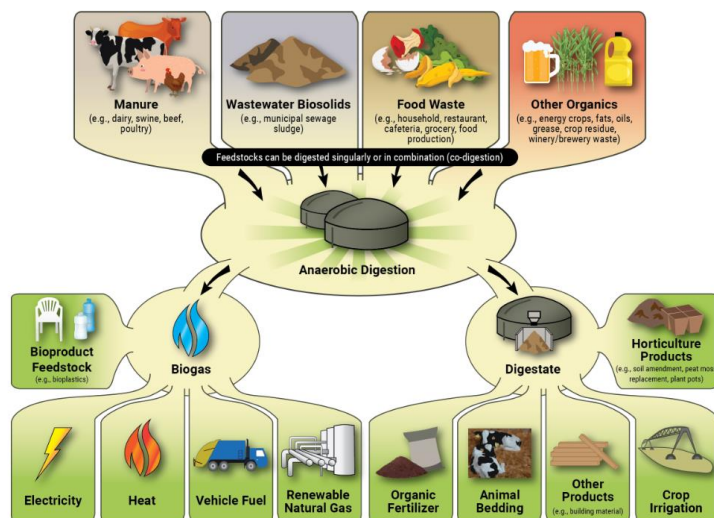
ANEXOS II

Figura 25. Fases del proceso de compostaje.



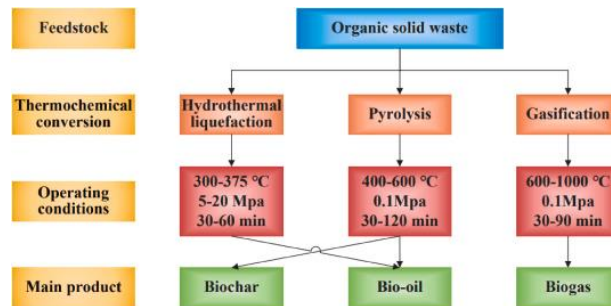
Fuente: Tomado del MANUAL DE COMPOSTAJE DEL AGRICULTOR de la FAO (2013).

Figura 26. Flujo de materias primas a través del sistema de AD para producir biogás y digestato.



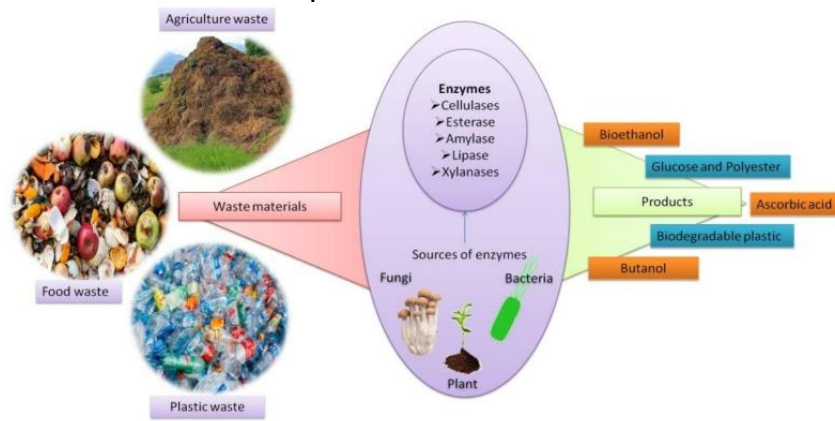
Fuente: US EPA, 2019.

Figura 27. Tecnología de conversión termoquímica.



Fuente: Tomado de Recent advances in organic waste pyrolysis and gasification in a CO₂ environment to value-added products, según Yang et al., (2024).

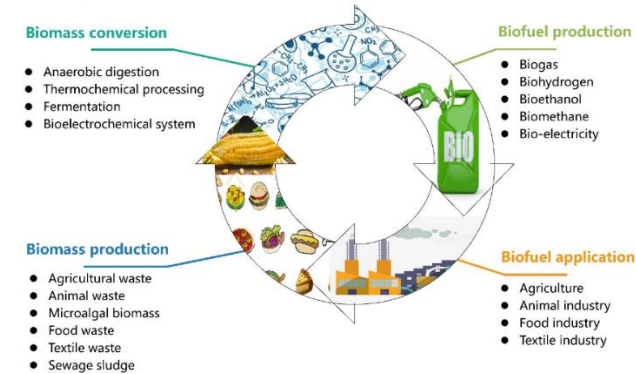
Figura 28. Biotransformación mediada por enzimas de material de desecho en productos útiles.



Fuente: Tomado de Enzymes-mediated solid waste management: A sustainable practice for recycling. según Janeeshma et al., (2024)

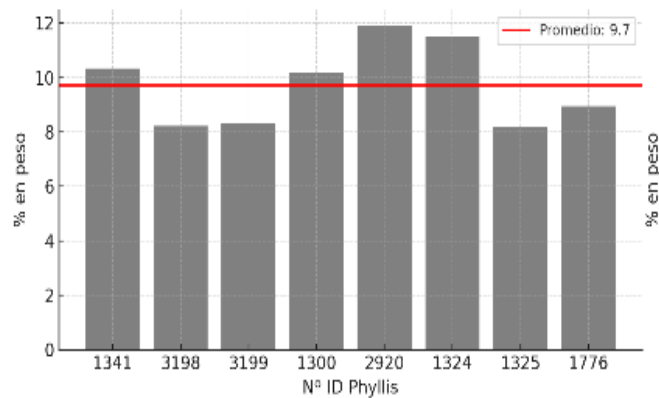
Figura 29. Ciclo de la producción de biocombustibles dentro de la bioeconomía circular.

Biofuel production from biomass in circular bioeconomy



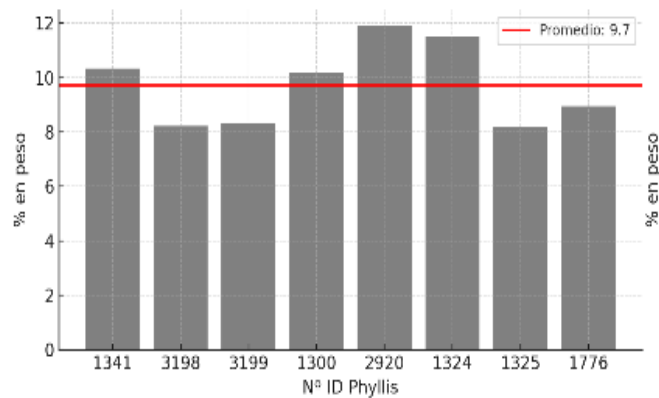
Fuente: Tomado: Biofuel Production for Circular Bioeconomy: Present Scenario and Future Scope, según Ye et al., (2024)

Figura 30. Contenido de carbono para los residuos del municipio de Arcabuco.



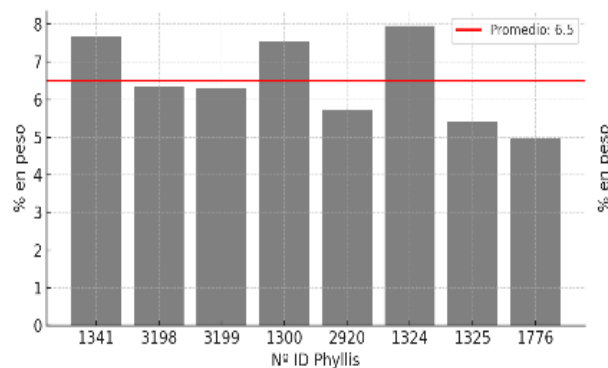
Fuente: Autor.

Figura 25 31. Contenido de carbono para los residuos del municipio de Arcabuco.



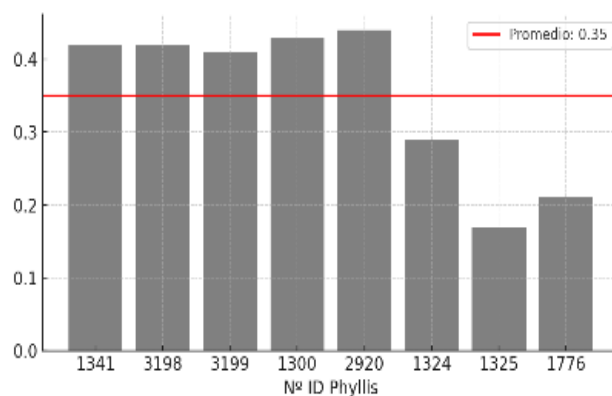
Fuente: Autor.

Figura 32. Contenido de oxígeno para los residuos del municipio de Arcabuco.



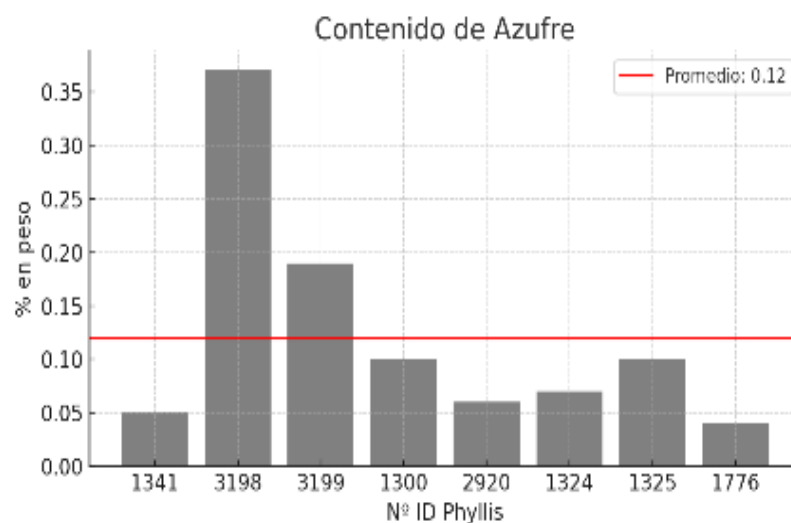
Fuente: Autor.

Figura 33. Contenido de nitrógeno para los residuos del municipio de Arcabuco.



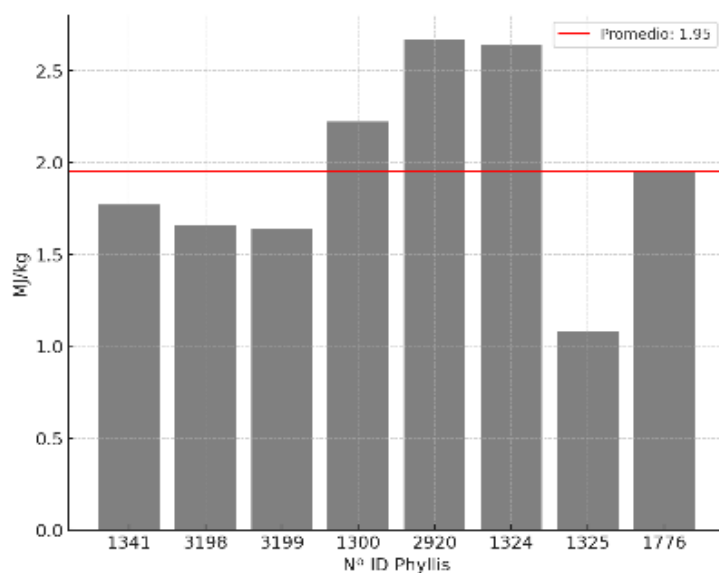
Fuente: Autor.

Figura 34. Contenido de azufre para los residuos del municipio de Arcabuco.



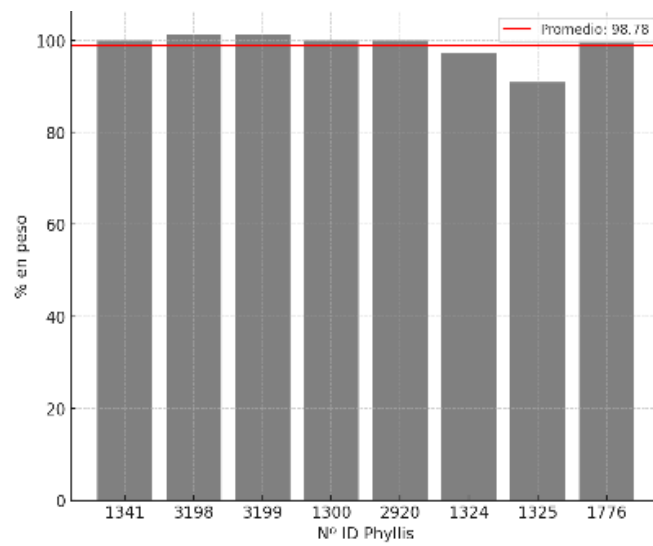
Fuente: Autor.

Figura 35. Contenido de PCN para los residuos del municipio de Arcabuco.



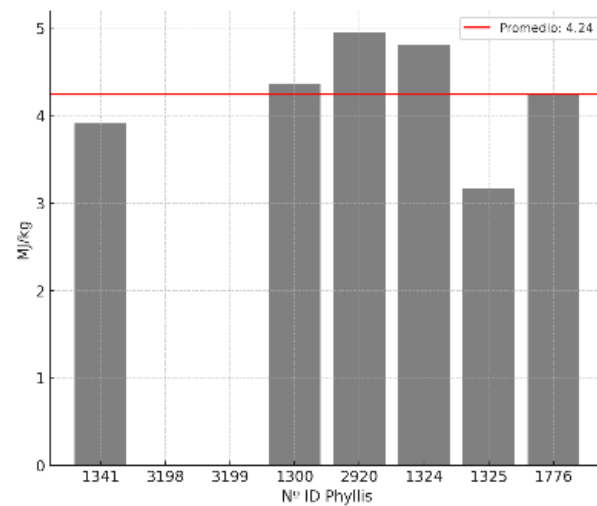
Fuente: Autor.

Figura 36. Contenido de haluros para los residuos del municipio de Arcabuco.



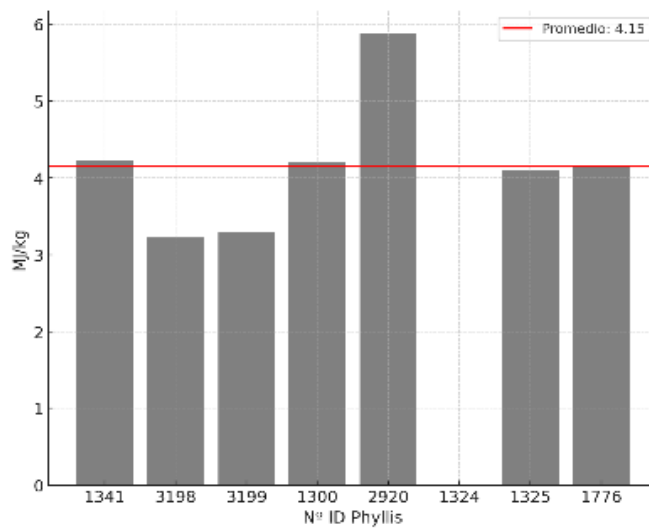
Fuente: Autor

Figura 37. Contenido de VPB para los residuos del municipio de Arcabuco.



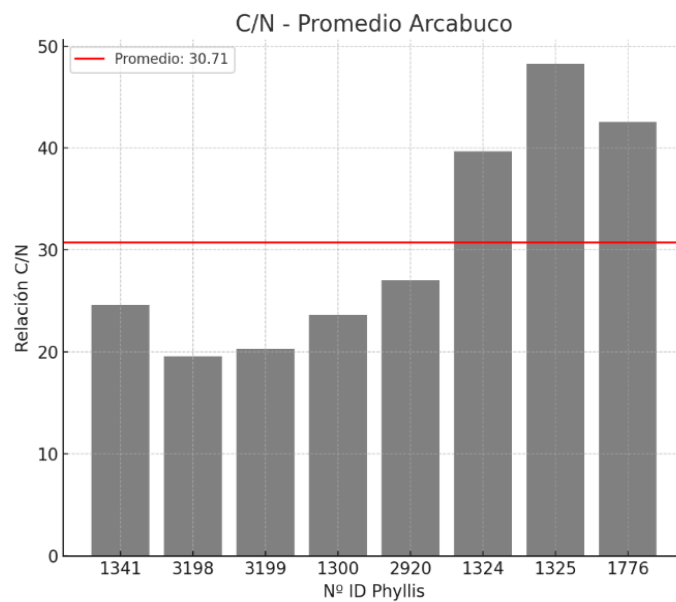
Fuente: Autor.

Figura 38. Contenido de HHV para los residuos del municipio de Arcabuco.



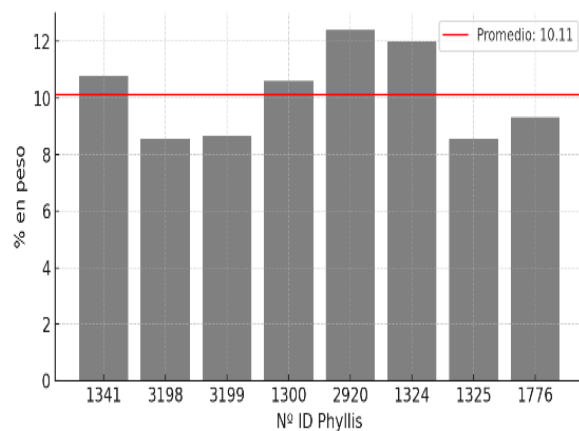
Fuente: Autor.

Figura 39. Contenido de C:N para los residuos del municipio de Arcabuco.



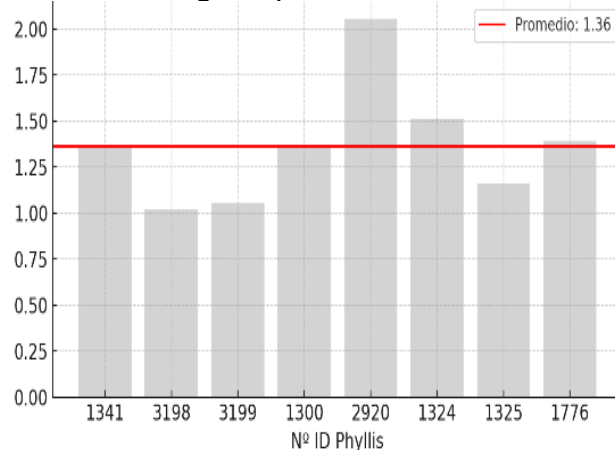
Fuente: Autor.

Figura 40. Contenido de carbono para los residuos del municipio de El Cocuy.



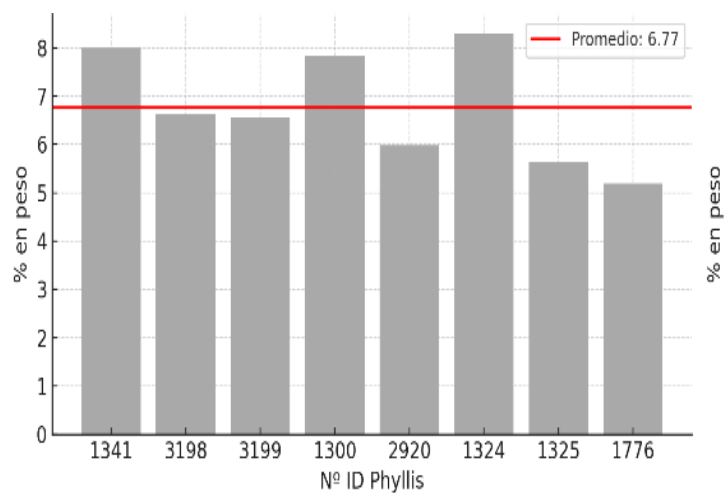
Fuente: Autor.

Figura 41. Contenido de hidrógeno para los residuos del municipio de El Cocuy.



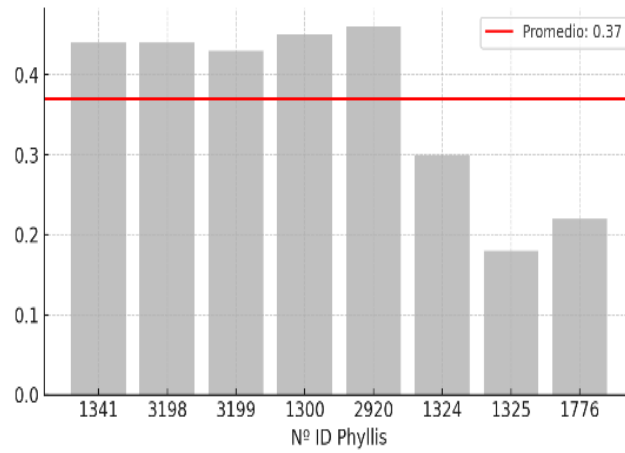
Fuente: Autor.

Figura 42. Contenido de oxígeno para los residuos del municipio de El Cocuy.



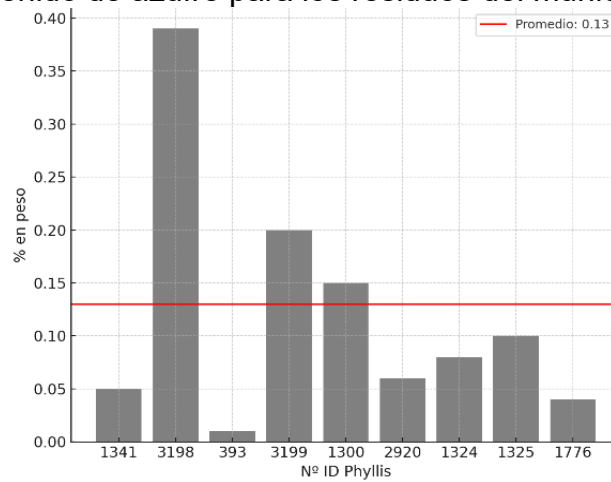
Fuente: Autor.

Figura 43. Contenido de nitrógeno para los residuos del municipio de El Cocuy.



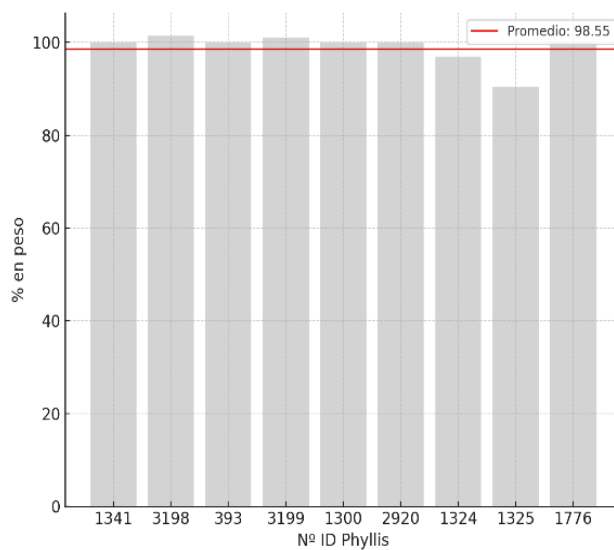
Fuente: Autor.

Figura 44. Contenido de azufre para los residuos del municipio de El Cocuy.



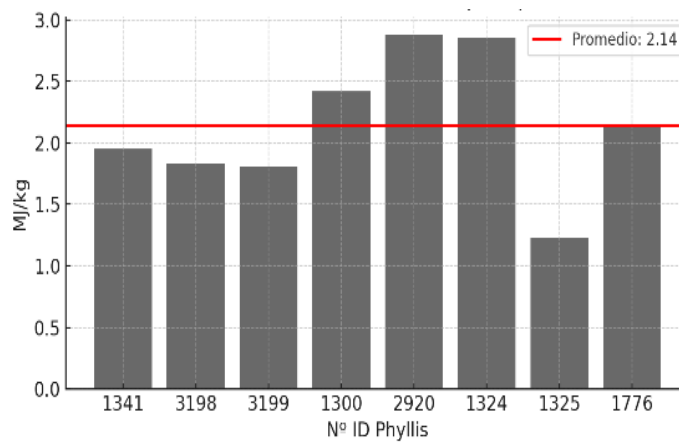
Fuente: Autor.

Figura 45. Contenido de haluros para los residuos del municipio de El Cocuy.



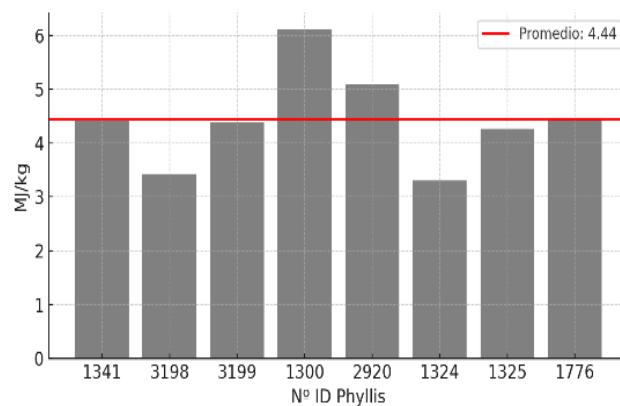
Fuente: Autor.

Figura 46. Contenido de PCN para los residuos del municipio de El Cocuy.



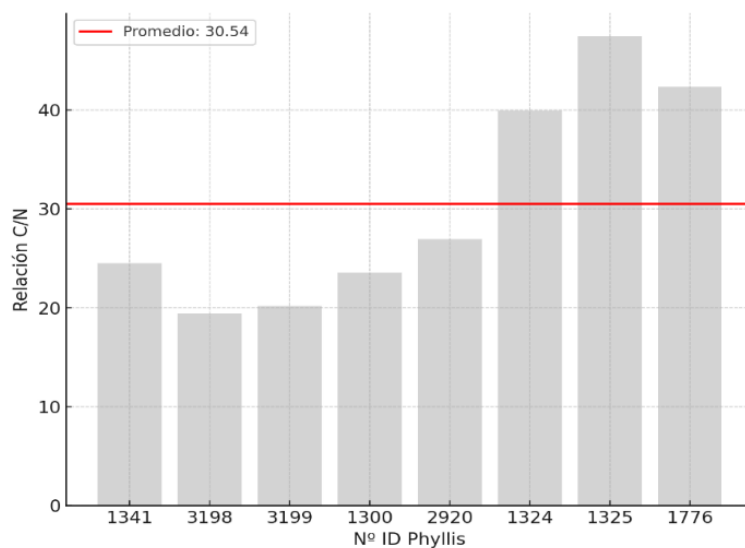
Fuente: Autor.

Figura 47. Contenido de HHV para los residuos del municipio de El Cocuy.



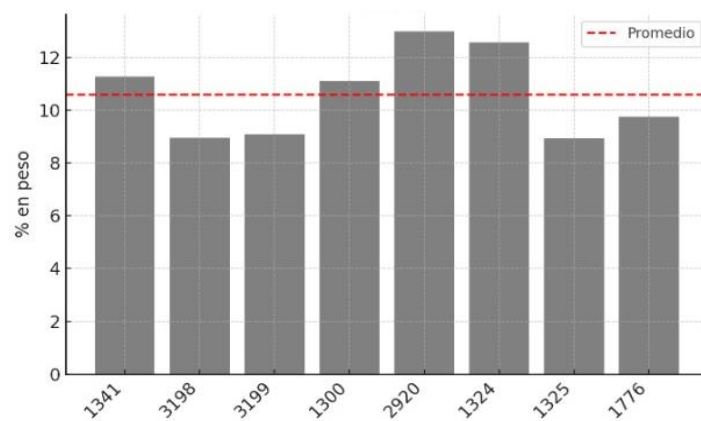
Fuente: Autor.

Figura 48. Contenido de C:N para los residuos del municipio de El Cocuy.



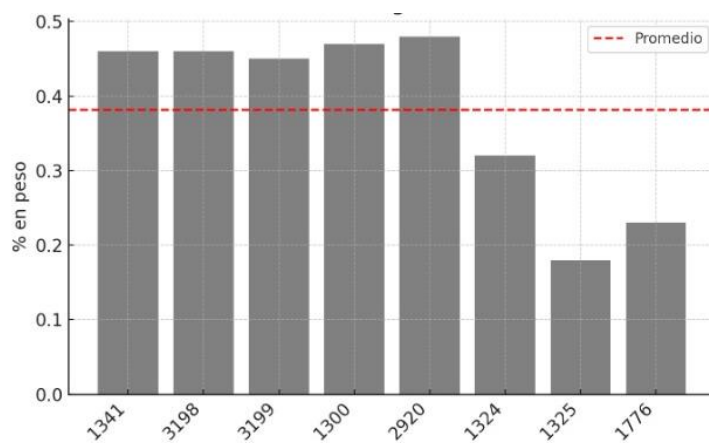
Fuente: Autor.

Figura 49. Contenido de carbono para los residuos del municipio de Sáchica.



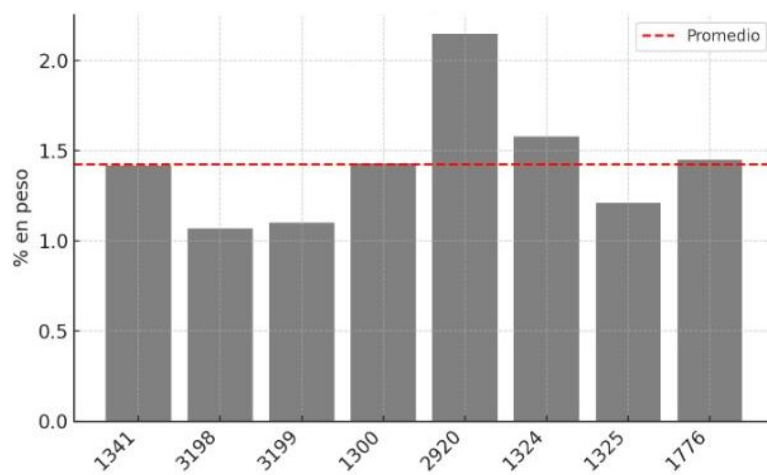
Fuente: Autor.

Figura 50. Contenido de nitrógeno para los residuos del municipio de Sáchica.



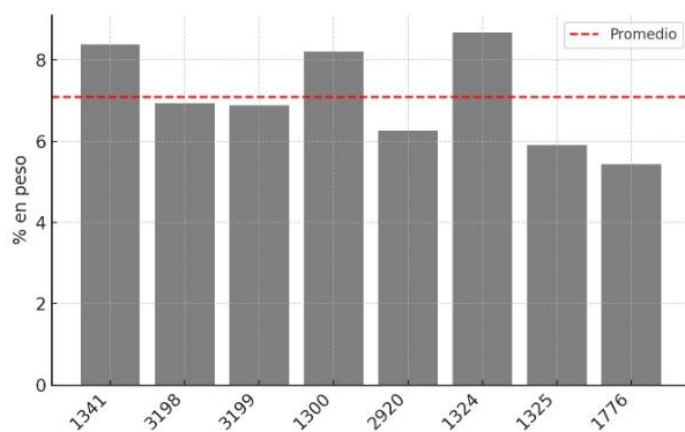
Fuente: Autor.

Figura 51. Contenido de hidrógeno para los residuos del municipio de Sáchica.



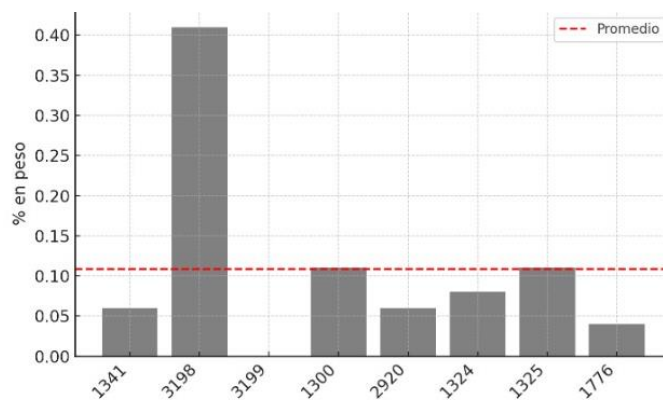
Autor: Fuente.

Figura 52. Contenido de oxígeno para los residuos del municipio de Sáchica.



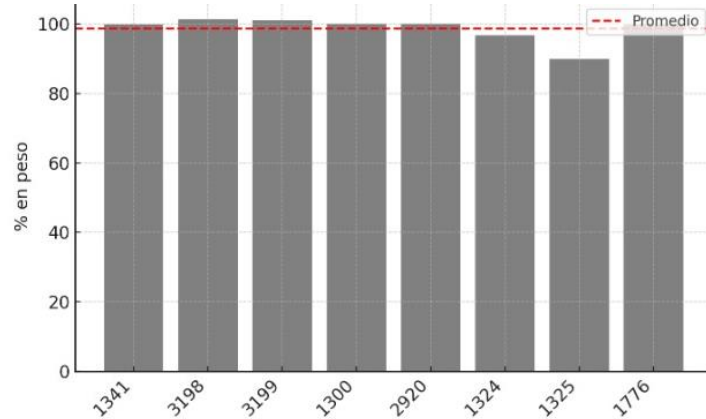
Fuente: Autor.

Figura 53. Contenido de azufre para los residuos del municipio de Sáchica.



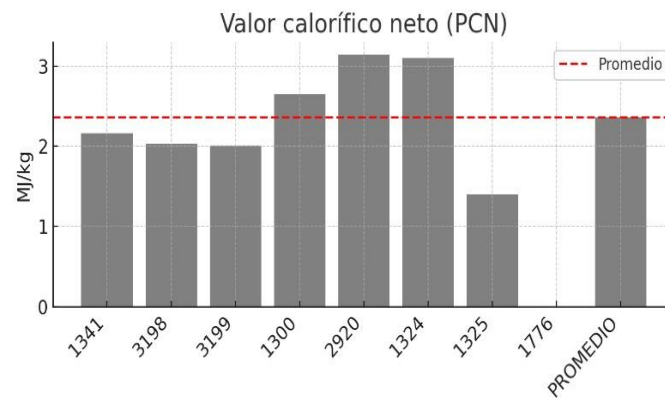
Fuente: Autor.

Figura 54. Contenido de haluros totales para los residuos del municipio de Sáchica.



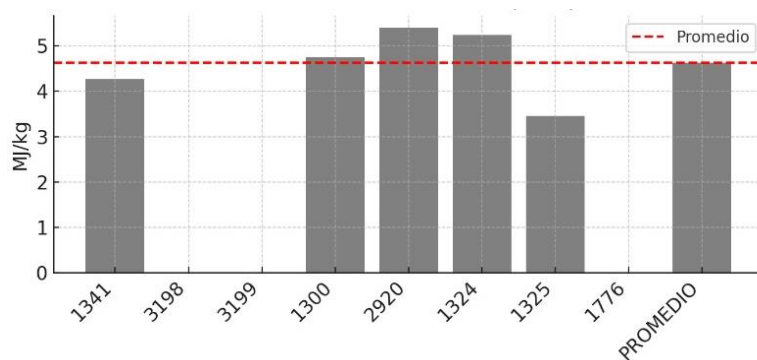
Fuentes: Autor.

Figura 55. Contenido de PCN para los residuos del municipio de Sáchica.



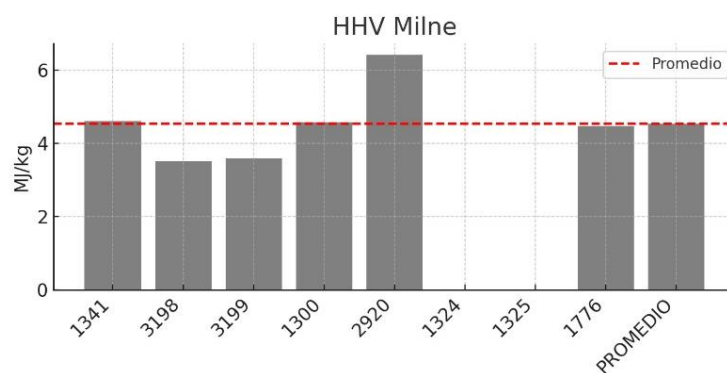
Fuente: Autor.

Figura 56. Contenido de VPB para los residuos del municipio de Sáchica.



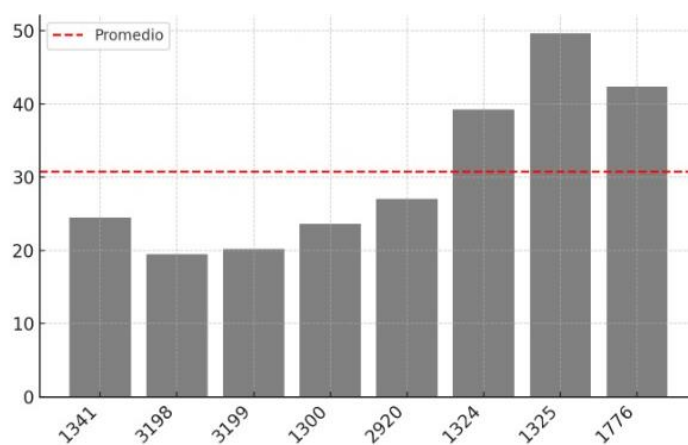
Fuente: Autor.

Figura 57. Contenido de HHV para los residuos del municipio de Sáchica.



Fuente: Autor.

Figura 58. Contenido de C/N para los residuos del municipio de Sáchica.



Fuente: Autor.